

Institut für Innovation, Transfer und Beratung
an den Fachhochschulen Bingen und Mainz

Untersuchung von Möglichkeiten zur Reinigung des Rauchgases holzbefeuertes Biomasse-Stirling-BHKW

Abschlußbericht über ein Entwicklungsprojekt,
gefördert unter dem Aktenzeichen 15340 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt.

von

Prof. Dr. Gunter Schaumann
Prof. Dr.-Ing. Winfried Sehn
Dipl.-Ing. (FH) Helmut Gerber

Juli 2003

| | | | |
|--|--|---|---|
| 11/95 | |  | |
| Projektkennblatt der Deutschen Bundesstiftung Umwelt | | | |
| Az | 15340 | Referat | 24/0 |
| | | Fördersumme | 156.000,00 DM |
| Antragstitel | Untersuchung von Möglichkeiten zur Reinigung des Rauchgases holzbefuerter Biomasse-Stirling-BHKW | | |
| Stichworte | Energie, Heizkraftwerk, Biomasse | | |
| Laufzeit | Projektbeginn | Projektende | Projektphase(n) |
| 2 Jahre | 01.08.2001 | 31.07.2003 | 3 |
| Zwischenberichte halbjährlich | 31.01.2002 | 31.07.2002 | 31.01.2003 / 10.03.2003 |
| Bewilligungsempfänger | Innovations- und Transferinstitut Bingen GmbH an der Fachhochschule Bingen Berlinstraße 107a 55411 Bingen | | Tel 06721/409-141 Fax 06721/409-129 Projektleitung Prof. Dr. G. Schaumann Bearbeiter Dipl.-Ing.(FH) H.Gerber |
| Kooperationspartner | - Fachhochschule Bingen - Forschungsinstitut für anorganische Werkstoffe – Glas/Keramik – GmbH (FGK), 56203 Höhr-Grenzhausen | | |
| <p>Zielsetzung und Anlass des Vorhabens</p> <p>Im Forst und bei der Verarbeitung von Holz fallen Resthölzer an, die nicht weiter genutzt werden können. Die Nutzung dieses Restholzes für Energiezwecke schließt den natürlichen Kreislauf, wobei die gekoppelte Energieumsetzung von Biomasse in Wärme und Strom in kleinen dezentralen Anlagen eine noch zu lösende Aufgabe ist. Hier bietet der Einsatz von Stirling-Motoren interessante Möglichkeiten zur Kraft-Wärme-Kopplung, da günstigere Investitions- und Betriebskosten, sowie bedeutend günstigere Wartungsintervalle als bei BHKW mit Otto- oder Dieselmotoren zu erwarten sind. Problematisch ist die Verschmutzungsneigung des Stirling-Erhitzerkopfes, die bisher den Betrieb einer solchen Anlage verhinderte. Im Rahmen dieses Projektes wurden Reinigungsmöglichkeiten von Rauchgasen aus Biomassefeuerungen zum Betrieb eines Stirlingmotors untersucht, und Lösungskonzepte für einen Dauerbetrieb eines Biomasse-Stirling-BHKW erarbeitet.</p> <p>Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden</p> <p>Um die für einen Betrieb des Stirlingmotors erforderlichen hohen (1000°C-1200°C) Rauchgastemperaturen zu erreichen wurde die vorhandene Holzhackschnitzelfeuerung schrittweise modifiziert. Die Ursachen und das Ausmaß der Verschmutzungen am Stirling-Erhitzerkopf wurden in entsprechenden Versuchen dargestellt. Daraufhin wurde durch Einsatz von verschiedenen Keramikfiltern versucht, die heißen Rauchgase zwischen Feuerung und Stirling-Erhitzerkopf zu reinigen. Parallel hierzu wurde ein keramischer Abgaswärmetauscher sowie ein alternativer Stirling-Erhitzerkopf mit verschmutzungsresistenter Geometrie entwickelt und in Versuchen getestet.</p> | | | |
| Deutsche Bundesstiftung Umwelt • An der Bornau 2 • 49090 Osnabrück • Tel 0541/9633-0 • Fax 0541/9633-190 | | | |

Ergebnisse und Diskussion

Nachdem das Rauchgas der modifizierten Holzhackschnitzelfeuerung auf das für den Betrieb des Stirling-BHKW notwendige Temperaturniveau gebracht werden konnte, wurde nachgewiesen, dass eine Reinigung der Rauchgase im für einen wirtschaftlichen Betrieb der Anlage angestrebten Temperaturbereich nicht mit unter ökonomischen Aspekten vertretbarem Aufwand zu leisten ist. Daher wurden, um das Ziel eines Dauerbetriebes zu erreichen, alternative Lösungsansätze weiterverfolgt. In Kooperation mit dem Forschungsinstitut für anorganische Werkstoffe – Glas/Keramik – GmbH (FGK) wurde ein keramischer Abgaswärmetauscher entwickelt, der die Wärme der Feuerung auf zirkulierende Reिनluft überträgt, mit der das Stirling-BHKW unter Beibehaltung des serienmäßigen Erhitzerkopfes betrieben werden kann. Nachteile dieser Lösung sind die im Verhältnis zur Gesamtanlage zu hohen Kosten (ca. 40% der Kosten für Stirling-BHKW), sowie die Anfälligkeit der Keramik gegen anhaftende Verschmutzungen aus aufgeschmolzenem Staub. Parallel hierzu wurde ein neuer Stirling-Erhitzerkopf konstruiert, der zum Betrieb mit durch Asche kontaminierten Rauchgasen geeignet ist. Durch Änderung der Geometrie, der Strömungsverhältnisse und der verwendeten Materialien konnte ein Wärmetauscher entworfen werden, der kostengünstig herstellbar ist und zusätzlich den Vorteil besitzt lokale Temperaturspitzen äußerst effektiv abzubauen. Hierdurch ist es erstmalig möglich mit nur einem Stirlingerhitzerkopf die Wärme verschiedenster Energiequellen (Sonne, Gas, Biomasse,..) auch im bivalenten Betrieb zu nutzen.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Die Ergebnisse dieser Arbeit wurden vorgestellt in folgenden Vorträgen:

-Entwicklungsschritte beim Holz-Stirling Blockheizkraftwerk der Fachhochschule Bingen

European Stirling Forum, 18.und 19.September 2002, Osnabrück.

-Kraft-Wärme-Kopplung mit Holzpellets

Energietag Rheinland-Pfalz, 19. September 2002, Bingen.

-Kraft-Wärme-Kopplung mit Holz

VVEW-Fachtagung: Regionale Anwendungen von effizienten Energieumwandlungstechniken,

29. Oktober 2002, Bingen.

-Das Holz-Stirlingmotor Blockheizkraftwerk an der Fachhochschule Bingen

Regenerative Energienutzung in Rheinland-Pfalz im Rahmen der Europäischen Biomassetage,

2. Oktober 2002, Bingen.

Die Anlage ist in die Demonstrationsanlagen des Kompetenzzentrums für rationelle und regenerative Energienutzung an der Fachhochschule Bingen integriert, und ist somit dauerhaft in Präsentationen im Rahmen von Veranstaltungen eingebunden.

Fazit

In dieser Entwicklungsarbeit konnte gezeigt werden, dass eine Reinigung der heißen Rauchgase zwischen Feuerung und Stirling-Erhitzerkopf auch unter Verwendung von Keramikbauteilen nicht möglich ist. Desweiteren hat sich herausgestellt, dass der Brennstoff Holzpellets aufgrund seiner sehr genau spezifizierten Eigenschaften besser zur Befuerung eines Stirlingmotors der verwendeten Leistungsklasse geeignet ist als Holzhackschnitzel. Um das Ziel eines Dauerbetriebes eines holzbefeuerten Stirling-BHKW dennoch erreichen zu können, war es notwendig, den Erhitzerkopf so zu modifizieren, dass keine anhaftenden Verschmutzungen mehr auftreten können. Der neuentwickelte Erhitzerkopf eignet sich aufgrund seiner hervorragenden Wärmeabfuhr auch zum Einsatz in solaren Anwendungen. Durch eine entsprechende Anpassung der Bauform ist ein bivalenter Betrieb mit Holz und Sonne möglich. Hierdurch könnte eine optimale Kopplung regenerativer Energieträger erreicht werden, da so auch bei Wegfall der solaren Einstrahlung ein kontinuierlich regenerativer Betrieb eines auf diesem Wärmetauscher basierenden Stirling-BHKW möglich ist. In einem weiteren Entwicklungsschritt könnte nun eine entsprechende Anlage zur energetischen Kopplung von Holz und Sonne unter Verwendung des neuentwickelten und zum Patent angemeldeten Erhitzerkopfes aufgebaut und untersucht werden.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|----|
| Abbildungsverzeichnis | 5 |
| Zusammenfassung | 6 |
| Einleitung | 7 |
| Erkenntnisse aus Voruntersuchungen | 11 |
| Modifikation Stirlingmotor | 12 |
| Modifikation Verbrennung 1 | 14 |
| Modifikation Verbrennung 2 | 15 |
| Modifikation Verbrennung 3 | 18 |
| Schadstoffemissionen | 20 |
| Filterversuche | 20 |
| Beurteilung der Erkenntnisse aus den Untersuchungen | 23 |
| Pelletfeuerung | 24 |
| Stirling Erhitzerkopf zum Einsatz bei kontaminierten Abgasen | 28 |
| Fazit | 31 |
| Literaturverzeichnis | 32 |
| Veröffentlichungen und Vorträge | 33 |

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|--------------|--|----|
| Abbildung 1 | Vergleich verschiedener KWK-Systeme | 7 |
| Abbildung 2 | SOLO V-161 | 9 |
| Abbildung 3 | Stirling-BHKW | 10 |
| Abbildung 4 | Ablagerungen (weiß) am Stirlingerhitzer, gelbe Pfeile: Anströmungsrichtung | 11 |
| Abbildung 5 | Abhängigkeit elektrischen Leistung - Feuerungstemperatur | 12 |
| Abbildung 6 | Leistung - Feuerungstemperatur bei geänderter Steuerung | 12 |
| Abbildung 7 | Nutzbare Temperaturdifferenz | 13 |
| Abbildung 8 | Energiebilanz ohne Wärmerückgewinnung | 14 |
| Abbildung 9 | BHKW Modifikation 1 | 14 |
| Abbildung 10 | BHKW Modifikation 2 | 15 |
| Abbildung 11 | Anlagenfotos | 15 |
| Abbildung 12 | Strömungsführung der serienmäßigen Feuerung | 16 |
| Abbildung 13 | Strömungsführung in der modifizierten Feuerung | 16 |
| Abbildung 14 | BHKW-Testlauf mit modifizierter Sekundärbrennkammer | 17 |
| Abbildung 15 | Aufhäufung von Brennstoff auf Schrägrost | 17 |
| Abbildung 16 | Schlacke aus der Primärfeuerungskammer | 18 |
| Abbildung 17 | Energiefluss bei vollem Wärmerückgewinn | 18 |
| Abbildung 18 | BHKW Modifikation 3 | 19 |
| Abbildung 19 | Schadstoffemissionen | 20 |
| Abbildung 20 | Mit Staub belegte Gittermatrix | 20 |
| Abbildung 21 | Ablagerungsschema | 21 |
| Abbildung 22 | Belegter Porenfilter Filter aus Aluminiumoxid | 21 |
| Abbildung 23 | Keramische Filtermatte aus Aluminiumoxid | 22 |
| Abbildung 24 | Keramikfilter (SiC-Keramik) vor und nach Beaufschlagung | 22 |
| Abbildung 25 | Schematische Aufheizverläufe | 24 |
| Abbildung 26 | Prüfstand Pelletfeuerung | 24 |
| Abbildung 27 | Keramischer Rohrbündelwärmetauscher (FGK) | 25 |
| Abbildung 28 | Keramischer Plattenwärmetauscher (FGK) | 26 |
| Abbildung 29 | Keramik Hochtemperatur Abgaswärmetauscher | 26 |
| Abbildung 30 | Keramikrohr mit glasiertem Staubüberzug (innen) | 27 |
| Abbildung 31 | Verschmutzungsresistenter Erhitzerkopf | 28 |
| Abbildung 32 | Röhrchenbündel (rechte Seite) | 28 |
| Abbildung 33 | Einbausituation des neuem Erhitzerkopfes | 29 |
| Abbildung 34 | Erhitzerkopf (neu) nach Beaufschlagung mit Rauchgas | 29 |
| Abbildung 35 | Wärmezufuhr durch solare Strahlung | 30 |

Zusammenfassung

Im Rahmen dieses Projektes wurden Reinigungsmöglichkeiten von Rauchgasen aus Biomassefeuerungen zum Betrieb eines Stirlingmotors untersucht, und Lösungskonzepte für einen Dauerbetrieb eines Biomasse-Stirling-BHKW erarbeitet. Hierzu musste zuerst die vorhandene Holzhackschnitzelfeuerung schrittweise so modifiziert werden, dass die für den Betrieb eines Stirlingmotors notwendigen Rauchgastemperaturen $>1000^{\circ}\text{C}$ erreicht werden konnten. Danach wurden Art und Form der Ablagerungen am Stirling-Erhitzerkopf analysiert, und Konzepte zur Reinigung der Rauchgase geplant und erprobt. Hierbei wurde festgestellt, dass eine Reinigung der Rauchgase im für einen wirtschaftlichen Betrieb der Anlage angestrebten Temperaturbereich, nicht mit unter ökonomischen Aspekten vertretbarem Aufwand zu leisten ist. Daher wurden, um das Ziel eines Dauerbetriebes zu erreichen, alternative Lösungsansätze weiterverfolgt. In Kooperation mit dem Forschungsinstitut für anorganische Werkstoffe – Glas/Keramik – GmbH (FGK) wurde ein keramischer Abgaswärmetauscher entwickelt, der die Wärme der Feuerung auf zirkulierende Reinfluft überträgt, mit der das Stirling-BHKW unter Beibehaltung des serienmäßigen Erhitzerkopfes betrieben werden kann. Nachteile dieser Lösung sind die im Verhältnis zur Gesamtanlage zu hohen Kosten (ca. 40% der Kosten für Stirling-BHKW), sowie die Anfälligkeit der Keramik gegen anhaftende Verschmutzungen aus aufgeschmolzenem Staub. Parallel hierzu wurde ein neuer Stirling-Erhitzerkopf konstruiert der zum Betrieb mit durch Asche kontaminierten Rauchgasen geeignet ist. Durch Änderung der Geometrie, der Strömungsverhältnisse und der verwendeten Materialien konnte ein Wärmetauscher entworfen werden, der kostengünstig herstellbar ist, und zusätzlich den Vorteil besitzt lokale Temperaturspitzen äußerst erst effektiv abzubauen. Hierdurch ist es erstmalig möglich mit nur einem Stirlingerhitzerkopf die Wärme verschiedenster Energiequellen (Sonne, Gas, Biomasse,..) auch im bivalenten Betrieb zu nutzen.

Dieses Entwicklungsprojekt wurde gefördert von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt unter dem Aktenzeichen 15340.

Einleitung

Die Biomasse Holz ist ein CO₂-neutraler regenerativer Energieträger. Aus diesem Grund wird durch den verstärkten Einsatz von Restholz zur Energieerzeugung ein Beitrag zum Ziel der Bundesregierung - einer 25 %igen CO₂-Minderung bis zum Jahr 2005 - geleistet. Der Beitrag von Restholz zur Energiebedarfsdeckung kann zukünftig noch wesentlich gesteigert werden.

Zur möglichst effizienten Nutzung des Energieinhalts eines Brennstoffes eignen sich vor allem Verfahren der gekoppelten Produktion von Strom und Wärme. Die energetische Restholznutzung in Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) ist jedoch für kleine elektrische Leistungen noch nicht gelöst.

Bisherige Lösungen, wie der Weg über die konventionelle Holzvergasung sind wegen umweltbelastender Folgeprodukte bei der Gasreinigung nicht akzeptabel.

Aus diesem Grund befasst sich die Transferstelle für rationelle und regenerative Energienutzung der Fachhochschule Bingen (TSB) seit längerer Zeit mit möglichen Lösungsansätzen. Dabei wird besonderen Wert auf Energieanlagen mit kleiner elektrischer Leistung gelegt, um dem dezentralen Bedarf und der dezentralen Verfügbarkeit der Biomasse Holz gerecht zu werden. Es sollten Anlagen entwickelt werden, die sowohl in kleineren Betrieben als auch in einzeln stehenden Liegenschaften von ihrer Leistungsgröße her sinnvoll sind. Die TSB bearbeitet in der Innovations- und Transferinstitut Bingen GmbH (ITB) den Themenbereich Energie.

Im Vergleich zur getrennten Erzeugung von Strom in einem modernen GuD-Kraftwerk ($\eta_{el} = 58\%$) und Wärme mit einem Erdgas-Brennwertkessel können bei der KWK durch ein erdgasbetriebenes BHKW ($\eta_{el} = 35\%$) die CO₂-Emissionen um mehr als 10 % reduziert werden. Durch ein mit Holzhackschnittel (HHS) befeuertes Biomasse-Stirling-BHKW ($\eta_{el} = 25\%$) könnten die CO₂-Emissionen dagegen um ca. 90 % reduziert werden. Dieser Vorteil vergrößert sich noch bei einem Vergleich mit dem bestehenden Kraftwerksmix in der BRD, dessen Wirkungsgrad (η_{el}) derzeit noch unter 40 % liegt. Bei den Varianten mit KWK ergibt sich ein fast gleicher Primärenergieverbrauch bei unterschiedlichen Brennstoffen. Durch die energetische Nutzung von Restholz ergeben sich jedoch deutliche ökologische Vorteile für das mit HHS befeuerte Biomasse-Stirling-BHKW.

Für die energetische Nutzung von Restholz gibt es folgende wesentliche Möglichkeiten der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK):

- den Dampfprozess mit Dampfturbine oder Dampfmotor,
- die Holzvergasung mit Verbrennungsmotor und
- den außenbefeuerten Stirling-Motor.

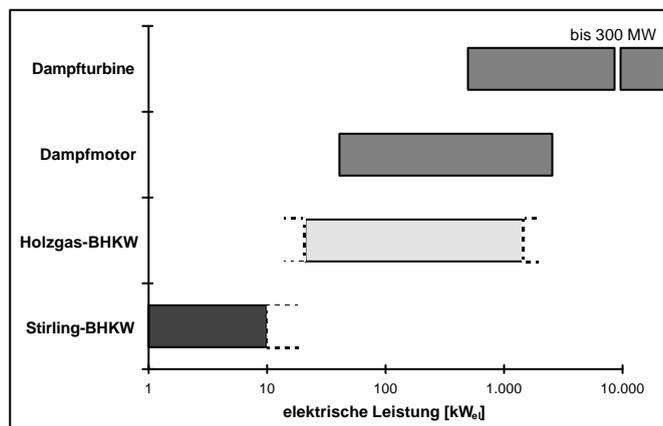


Abbildung 1 Vergleich verschiedener KWK-Systeme

Dampfprozess: Einer üblichen Holzfeuerung kann ein Dampferzeuger nachgeschaltet werden. Der Dampf wird meist über Dampfturbinen zur Erzeugung von elektrischer Energie genutzt. Auch Dampfmaschinen werden gelegentlich eingesetzt. Als wirtschaftliche Untergrenze gilt für die Dampfturbine eine elektrische Leistung von 1 MW_{el} und für den Dampfmaschine von 150 kW_{el}. KWK-Anlagen mit Leistungen kleiner 50 kW_{el} zur dezentralen Nutzung von Restholz sind derzeit am Markt nicht erhältlich.

Holzvergasung: Ein mit Holzgas betriebenes Blockheizkraftwerk (BHKW) wird zur Zeit von keinem Hersteller marktreif angeboten. Die Entwicklung lässt erwarten, dass nur Anlagen mit mehr als 50 kW_{el} eine Marktreife erlangen werden.

Stirling-Motor: In der Leistungsklasse wesentlich unter 50 kW_{el} ist der Einsatz von Stirling-Motoren sinnvoll. Verschiedene Hersteller betreiben Prototypen oder arbeiten an der Entwicklung von Kleinserien zum Betrieb mit Erdgas. Von der Stirling-Technologie verspricht man sich bedeutend günstigere Wartungsintervalle als bei Otto- oder Diesel-Motoren und dementsprechend günstigere Betriebskosten.

Durch das Prinzip der äußeren Verbrennung ist der Stirling-Motor selbst nicht anfällig für im Rauchgas enthaltene Partikel. Die momentanen Entwicklungen bei den Stirling-Motoren lassen erwarten, dass im Leistungsbereich bis 10 kW_{el} der Einsatz von Stirling-Motoren in BHKWs in absehbarer Zeit realisierbar ist.

Im Laufe der Vorstudien zu diesem Forschungsprojekt wurde mit folgenden Herstellern von Stirling-Motoren, die sich momentan oder früher mit der Biomassenutzung beschäftigt haben, Kontakt aufgenommen:

| | elektrische Leistung |
|---------------------------------------|---------------------------|
| Magnet-Motor GmbH, Starnberg | 10 u. 40 kW _{el} |
| Saarberg (Saarbergwerke AG), Sulzbach | 20 kW _{el} |
| SOLO-Kleinmotoren GmbH, Sindelfingen | 9 kW _{el} |

Die Fa. Magnet-Motor GmbH betreibt derzeit einen Prototyp mit 40 kW_{el}, der gegenüber dem kleineren Motor eine Weiterentwicklung darstellt. Die relativ einfache Konzeption der Maschine und ihre hermetische Abdichtung versprechen eine gute Zuverlässigkeit und Haltbarkeit. In Krailling bei München wird derzeit von den Firmen Magnet-Motor und Köb & Schäfer eine Pilotanlage in Verbindung mit einem Holzschneid-Heizwerk betrieben.

Der Stirling-Motor St 20/1 von Saarberg ist eine Weiterentwicklung des Motors der früheren Fa. Ecker. Derzeit werden von Saarberg zwei Prototypen betrieben. Von der Saarbergwerke AG wurde 1998 der Aufbau einer Maschine mit HHS-Feuerung in Zusammenarbeit mit der Fa. Geul-Schmid Holzfeuerungen (Filderstadt) geplant und durchgeführt.

In einem durch die EU unterstützten Vorhaben wurden von SOLO Betriebserfahrungen beim Einsatz des Stirling-Motors V160F in einer Biomasse-Wirbelschichtfeuerung gemacht. Um die Nennleistung von 9 kW_{el} bzw. eine Heliumtemperatur von 650 °C zu erreichen, müsste die Rauchgastemperatur bei 1.200 bis 1.900 °C liegen. Bei Rauchgastemperaturen über 900 °C beginnen aber einzelne Bestandteile der Aschepartikel anzuschmelzen, die dann am Erhitzer des Stirling-Motors festkleben. Durch den Einsatz eines Zyklonabscheiders (aus Metall) und gelegentlicher Druckluftstöße zur Abreinigung des Erhitzers konnte ein stabiler Betrieb bei der mit Pinienhackschnitzeln betriebenen Anlage ermöglicht werden. Bei einer Rauchgastemperatur von 860 °C stellte sich eine Arbeitsgastemperatur des Heliums von 530 °C bzw. eine elektrische Leistung von ca. 4 kW_{el} ein.

Der Stirling-Motor der Fa. SOLO-Kleinmotoren GmbH hat aufgrund seines Entwicklungsstandes die besten Chancen auf eine baldige erfolgreiche Markteinführung. Hierfür spricht die 2002 abgeschlossene Felderprobung von 20 gasbefeuerten BHKW-Modulen mit dem Stirling-Motor V161, der ebenfalls in Dish-Stirling-Systemen von SOLO eingesetzt wird.

Von der Technischen Universität von Dänemark wurden Versuche mit einem 4-Zylinder-Stirling-Motor durchgeführt. Dieser ist mit den Wärmetauschern kopfüber in eine konventionelle Biomassefeuerung integriert. Bei dem mit Holzhackschnitzeln durchgeführtem Versuch wurde eine elektrische Leistung von 30 kW_{el} bei einer Heliumtemperatur von 685 °C erzielt. Die Feuerraumtemperatur betrug ca. 1.200 °C. Die Versuche zeigten, dass aufgrund der Vibrationen des Stirling-Motors eine Verbesserung der Entkopplung zwischen Stirling-Motor und Brennraum notwendig ist, da ansonsten die Schamottierung der Brennkammer in Mitleidenschaft gezogen werden könnte. Diese Ergebnisse wurden auf dem Europäischen Stirling Forum 1998 in Osnabrück vorgestellt.

Das wesentliche Problem bei der Verknüpfung einer Biomassefeuerung mit dem Stirling-Motor besteht bei der Wärmeübertragung aus dem Rauchgas einer Feuerung an den Erhitzer eines Stirling-Motors. Auch bei modernen Biomassefeuerungen lässt sich die Aschebildung nicht vermeiden, wodurch bei hohen Temperaturen auch die Gefahr der Ascheerweichung im Rauchgas besteht.

Aufgrund der für den Betrieb des Stirling-Motors benötigten hohen Temperaturen des Arbeitsgases Helium (> 650 °C) und des möglichst kleinen Schadraumvolumens im Wärmetauscher ergeben sich große Wärmetauscherflächen auf wenig Raum, die sehr feinrippig ausgeführt werden und deshalb anfällig gegen Ablagerungen sind. Das bei der Biomassefeuerung entstehende staub- und teerhaltige Rauchgas führt zu einer vorschnellen Verschmutzung oder sogar Zerstörung der für den Erdgasbetrieb konzipierten Wärmetauscher. Eine Reduzierung der Arbeitsgastemperatur führt hingegen zu einer deutlichen Verschlechterung des Wirkungsgrades des Stirling-Motors.

Aufgrund des am weitesten fortgeschrittenen Entwicklungsstandes des Stirling-Motors der Fa. SOLO und der geringen Abmessungen favorisieren wir dessen Einsatz für ein Biomasse-Stirling-BHKW . Der Stirlingmotor SOLO V161 verfügt über einen Verdichtungs- und einen Arbeitszylinder, zwischen denen das Arbeitsgas Helium in einem geschlossenen Kreisprozess hin- und hergeschoben wird. Im Verdichtungszyylinder erfolgt bei niedriger Temperatur unter Wärmeabfuhr an das Kühlwasser die Kompression, beim isochoren Überschieben in den Arbeitszylinder nimmt das Gas Wärme aus dem Regenerator auf, und erwärmt sich dadurch auf ca. 650°C. Bei der isothermen Expansion im Arbeitszylinder wird dem Gas im Erhitzerkopf Wärme zugeführt, danach erfolgt das Zurückschieben in den Kompressionszylinder, wobei es Wärme an den Regenerator abgibt und sich dabei abkühlt. Der Erhitzerkopf besteht aus mit Rippen versehenen Röhren, die von der Wärmequelle auf etwa 700°C erwärmt werden, der Arbeitsgaskühler aus einem vom Kühlwasser durchströmten Röhrenbündel. Der Regenerator, der einen thermischen Speicher zwischen den beiden Temperaturniveaus darstellt, besteht aus einem Paket von Drahtsieben. Um Strömungsverluste in den Wärmeübertragern zu vermindern wird als Arbeitsgas Helium verwendet.

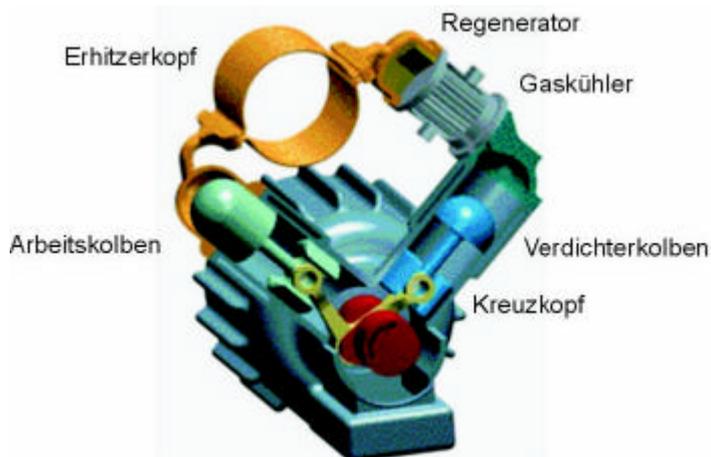


Abbildung 2 SOLO V-161

An der Fachhochschule Bingen wurde eine Versuchsanlage bestehend aus einem SOLO V-161 und einer Biomassefeuerung (Fa. WVT) aufgebaut, die auf einem Prüfstand im Motorenlabor des Fachbereichs Maschinenbau betrieben und getestet wird.

Im Rahmen dieses Vorhabens sollen Untersuchungen von Verfahren zur Rauchgasreinigung an diesem holzbefeuerten Biomasse-Stirling-BHKW durchgeführt werden, so dass ein Dauerbetrieb einer solchen Anlage erreicht werden kann. Die Schwachstellen des Systems sollen durch die Optimierung und Neuentwicklung einzelner Bauteile behoben werden. Ziel des Forschungsprojektes ist die Erforschung von Verfahren zur Rauchgasreinigung an Biomassefeuerungen, zur Verbesserung der Standfestigkeit eines mit diesem Rauchgas beaufschlagten Stirling-Wärmetauschers. Durch den Einsatz von keramischen Bauteilen soll der Betrieb eines Stirlingmotors mit einer Biomassefeuerung realisiert werden. Hierzu werden gemeinsam mit dem Forschungsinstitut für anorganische Werkstoffe – Glas/Keramik – GmbH (FGK), keramische Bauteile z.B. Partikelfilter oder keramische Wärmetauscher entwickelt, und dann getestet und optimiert.

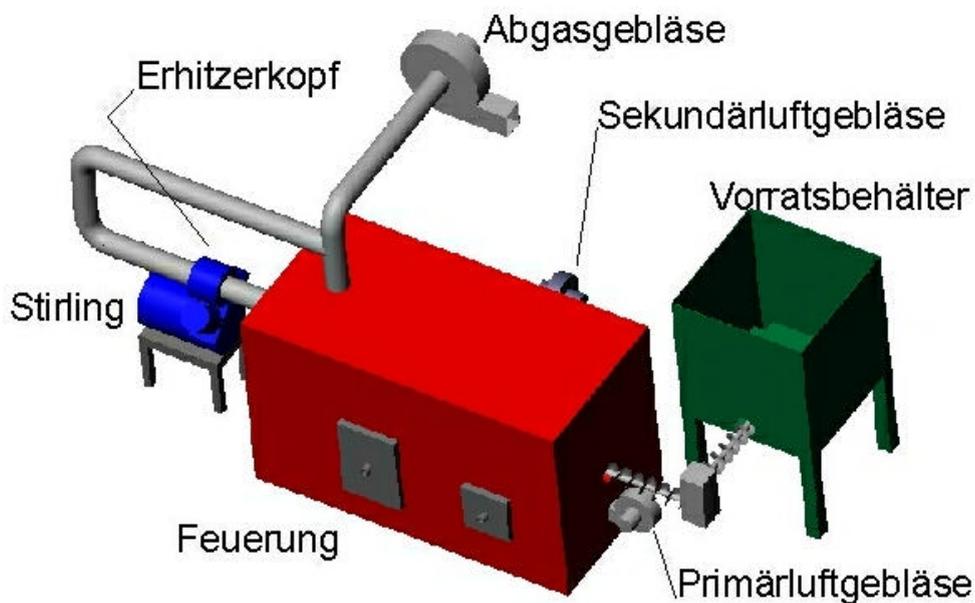


Abbildung 3 Stirling-BHKW

Der Wirkungsgrad der Anlage soll durch eine größere Spreizung zwischen Arbeitgastemperatur des Stirlingmotors und Rauchgastemperatur optimiert werden. Die im Rauchgas einer Biomassefeuerung enthaltenen Staubpartikel und Ascheanteile führen bei einer direkten Beaufschlagung des feinverrippen Wärmetauschers (Erhitzer) eines Stirling-Motors innerhalb kürzester Zeit zu anhaftenden Verbackungen, die zu einem schlechteren Wärmeübergang, somit zu einem abfallenden Wirkungsgrad, und in der Folge zur Zerstörung des Erhitzerkopfes am Stirlingmotor führen. Aggressive Rauchgase können außerdem bei den eingesetzten metallischen Werkstoffen Funktion und Lebensdauer der Anlagenteile beeinträchtigen. Für die Lösung des Problems sind Modifikationen im Bereich des Heißgasstromes vorgesehen. Aufgrund der hier herrschenden hohen Temperaturen ($>1.000^{\circ}\text{C}$) kommen zu diesem Zweck nur Bauteile aus Hochtemperaturkeramik in Betracht, wie keramische Filterelemente oder keramische Wärmetauscher.

Durch die gewonnenen Erkenntnisse soll der Einsatz von Stirling-Motoren an Feststofffeuerungen und bei aggressiven Prozessgasen ermöglicht werden, bei denen bisher ein störungsfreier Betrieb nicht erreicht werden konnte.

Erkenntnisse aus Voruntersuchungen

Die Verschmutzungen auf dem Stirlingerhitzerkopf erreichen bei der hier aufgebauten BHKW-Anlage nach ca. 10 Betriebsstunden ein Niveau, welches eine Unterbrechung des Betriebes, und eine mechanische Reinigung des Erhitzers notwendig macht. Für die Verschmutzungsneigung des Erhitzers sind die Staubkonzentration im Rauchgas sowie die Feuerungstemperatur ein wichtiges Kriterium. Die Staubkonzentration liegt im Durchschnitt bei 90 mg/m^3 . Der Staubgehalt ist stark abhängig von der Strömungsgeschwindigkeit des Rauchgases, sowie von der Stückigkeit des Brenngutes d.h. bei sehr feinem Brenngut und hohen Strömungsgeschwindigkeiten kann sich die Staubkonzentration vervielfachen. Abhängig von der Temperatur, der stofflichen Zusammensetzung sowie dem Durchmesser der Partikel fällt auch deren Wirkung unterschiedlich aus. Große Staubteilchen bewirken bei großen Strömungsgeschwindigkeiten Erosionserscheinungen an den Feuerfestmaterialien und insbesondere an den Wärmeübertragungsflächen des Stirling-Erhitzerkopfes. Feine Partikel führen zu festen bis verschlackten Ablagerungen die kurzfristig den Wärmeübergang verschlechtern, langfristig durch Akkumulation und Hochtemperaturkorrosion ein Versagen des Erhitzerkopfes bewirken können.

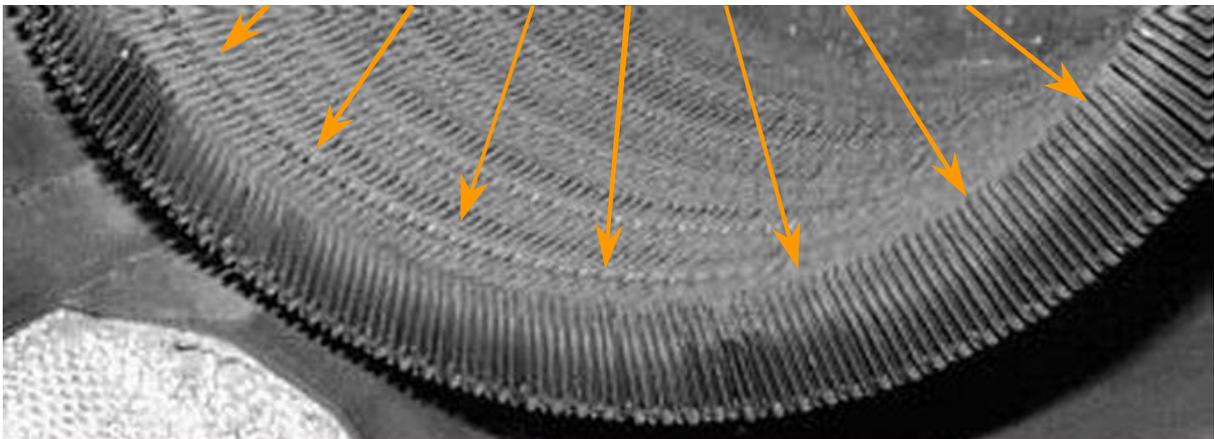


Abbildung 4 Ablagerungen (weiß) am Stirlingerhitzer, gelbe Pfeile: Anströmungsrichtung

Die im Verbrennungsprozess entstehenden Stäube lassen sich wie folgt einteilen:[ZB00]
Partikel aus unvollständiger Verbrennung.

- kohlenstoffhaltige Zersetzungsprodukte aus dem Brennstoff (Ruß).
- kohlenstoffhaltige kondensierte Syntheseprodukte (Teertröpfchen).
- unvollständig verbrannte Brennstoffteilchen (grob).

Partikel aus Brennstoffinhaltsstoffen.

- mit der Strömung ausgetragene Ascheteilchen (grob bis fein).
- kondensierte Salzverbindungen (sehr fein).
- Metallverbindungen (Salze, Oxide).

Eine für die Verschmutzungsneigung des Erhitzerkopfes entscheidende Größe ist die Erweichungstemperatur des Flugstaubes. Sie kennzeichnet den Übergang von einem ablagerungstechnisch unkritischen, leicht abzureinigenden Verhalten zu einem kritischen, klebrigen bzw. anbackenden Verhalten, welches durch Partikelaufschmelzungen und Kristallitbildungen verursacht wird [LMZ00]. Nach den ersten Testläufen der BHKW-Anlage war schnell erkennbar, dass die erforderlichen Rauchgastemperaturen am Erhitzer für einen effektiven Betrieb des Stirlingmotors im Nennleistungsbereich (9 kW_{el}) auf einem, für Holzhackschnitzelfeuerungen, sehr hohen Niveau zwischen 850°C und 1200°C liegen bei dem mit Aufschmelzungen zu rechnen ist.

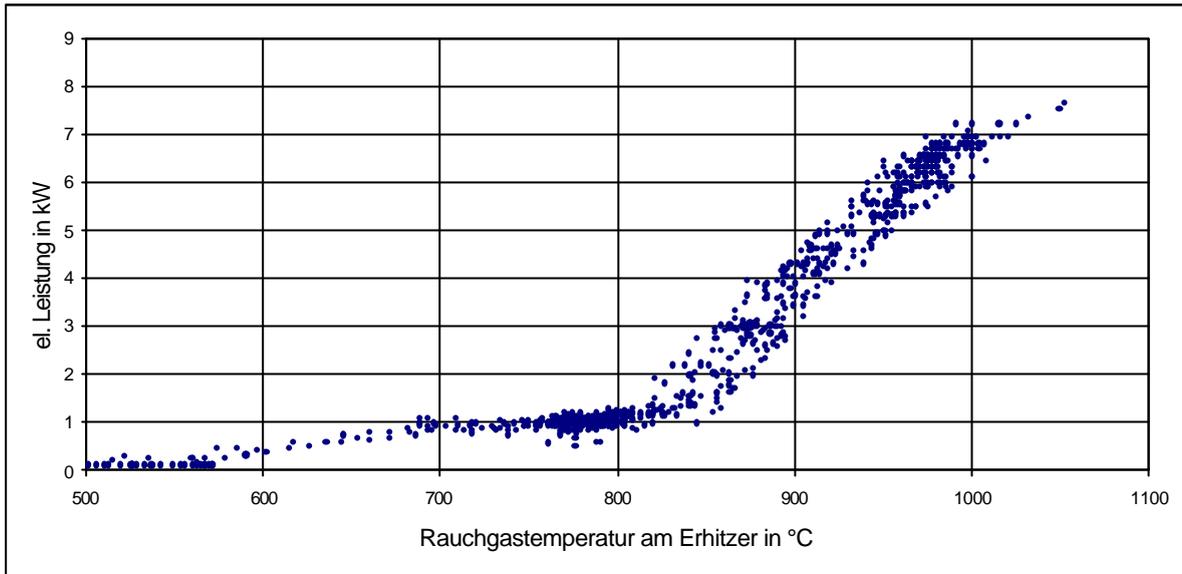


Abbildung 5 Abhängigkeit elektrischen Leistung - Feuerungstemperatur

Modifikation Stirlingmotor

Die in den Stirlingmotor eingebaute Leistungssteuerung wurde ursprünglich für den Solarbetrieb konzipiert. Die Besonderheiten im Solarbetrieb sind die sehr hohen Spitzentemperaturen im Erhitzerkopf durch die fokussierte Solarstrahlung, sowie die sehr hohen Temperaturgradienten im Betrieb. Zur Steuerung der abgegebenen elektrischen Leistung wird der Arbeitsgasdruck in der Maschine zwischen 30 und 150 bar variiert. So kann die Temperatur des Arbeitsgases (Helium) in allen Leistungsbereichen der Anlage konstant gehalten werden (650°C). Die vorliegende Steuerung ist ausgelegt auf eingebrachte Wärme erst im Temperaturbereich oberhalb 800°C zu reagieren, hier aber sehr schnell um den Stirlingerhitzer vor Überhitzung zu schützen. Für den Einsatz mit einer Biomassefeuerung wäre eine Steuerung sinnvoll, die schon bei niedrigeren Temperaturen am Erhitzer mit einer Druckerhöhung und somit einer Erhöhung der abgegebenen Leistung reagiert. Um diese Theorie zu erhärten wurde die serienmäßige Steuerung in mehreren Versuchen abgeschaltet, und durch eine eigene Steuerung ersetzt, die den Heliumdruck im Stirlingmotor schon bei niedrigeren Temperaturen erhöht.

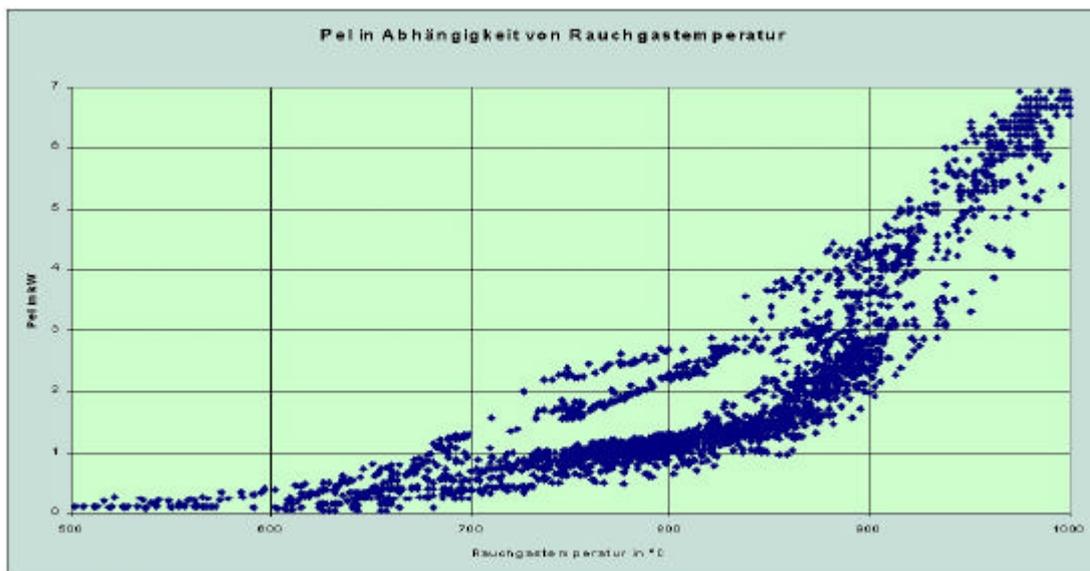


Abbildung 6 Leistung - Feuerungstemperatur bei geänderter Steuerung

In Abbildung 6 ist erkennbar dass insbesondere im Temperaturbereich zwischen 700°C und 900°C deutliche Leistungssteigerungen (bis 250%) möglich sind. Hier sind für den Stirlingmotorenhersteller SOLO Entwicklungspotentiale vorhanden, die für einen effektiven Betrieb des Motors in Kombination mit einer Biomassefeuerung genutzt werden sollten.

Um die Stirling-BHKW-Anlage bei gutem elektrischen Gesamtwirkungsgrad betreiben zu können, sind hohe Feuerungstemperaturen anzustreben. Bei diesen hohen Temperaturen ist die Erweichungstemperatur von großen Teilen der enthaltenen Staubfraktionen bereits erreicht [HN97]. Positiv ist bei hohen Ausbrandtemperaturen (>800°C) die Verminderung der De-Novo Synthese von polychlorierten Dibenzodioxinen und -furanen (PCDD/F) [SM94] zu bewerten. Durch die große Masse der in der Feuerung verwendeten Feuerfestmaterialien (Gesamtgewicht der Feuerung ca. 5t), ergeben sich allerdings hierbei sehr lange Aufheizzeiten, die den Versuchsbetrieb erschweren. Um die Verunreinigungen im angestrebten Betriebsbereich des Stirlingmotors nahe seiner Nennleistung quantifizieren, und Reinigungsmöglichkeiten für das Rauchgas entwickeln zu können, war es notwendig die Feuerung zu modifizieren. Die Feuerung wurde werksseitig für eine Feuerungsnennleistung von 80 kW bei einer Rauchgastemperatur von ca. 600°C ausgelegt. Benötigt werden allerdings ca. 200 kW bei einer Rauchgastemperatur von >1000°C bei möglichst geringen Staubemissionen.

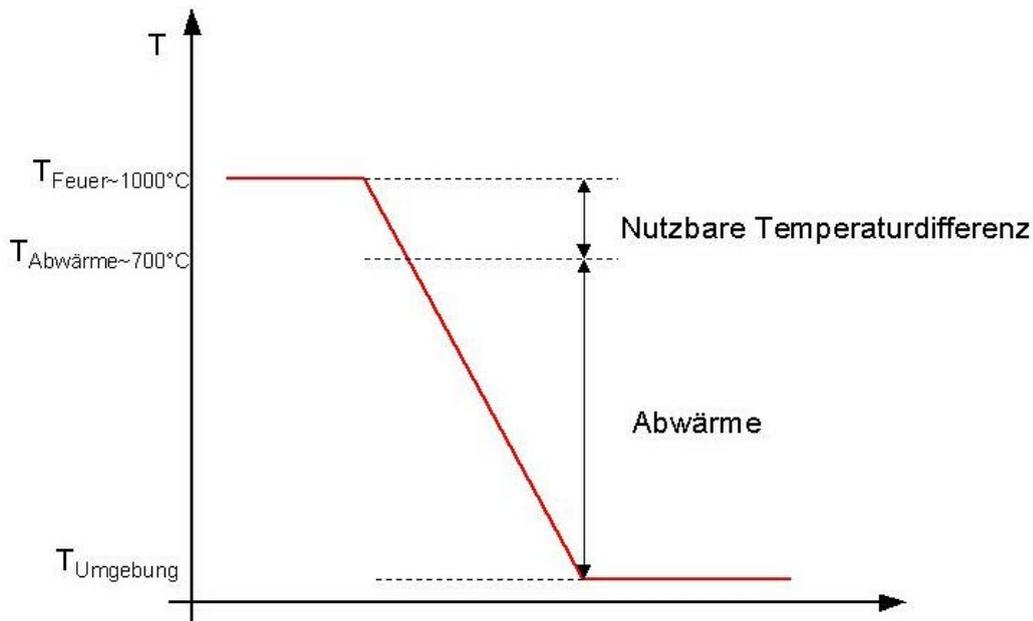


Abbildung 7 Nutzbare Temperaturdifferenz

Der Stirlingmotor kann nur die Wärmeenergieanteile abschöpfen, die ihm im Temperaturbereich oberhalb 700°C zur Verfügung gestellt werden, da die Heliumtemperatur im Erhitzerkopf durch die Steuerung des Motors bei ca. 650°C konstant gehalten wird und somit keine weitere Abkühlung des Rauchgases erfolgen kann.

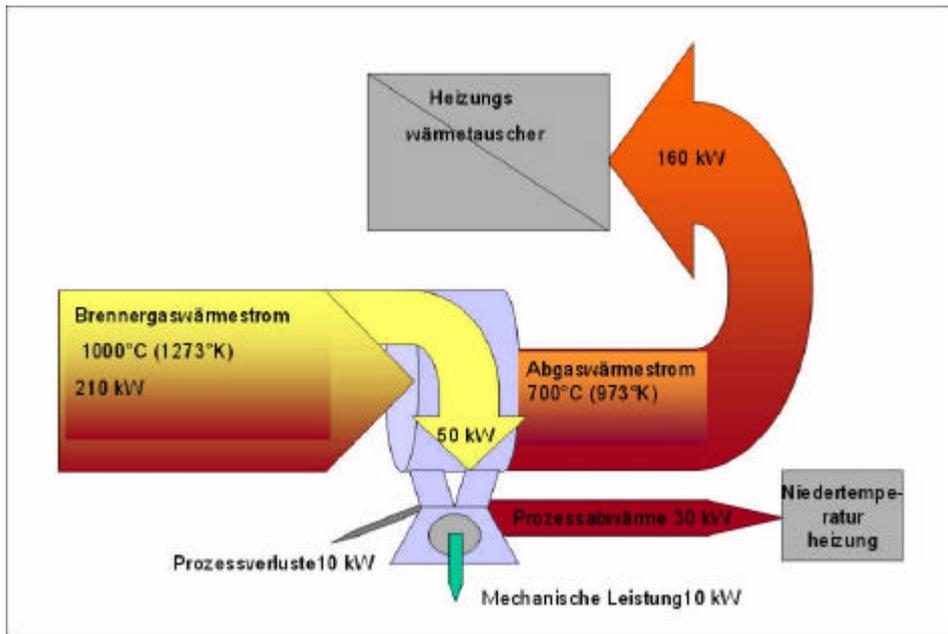


Abbildung 8 Energiebilanz ohne Wärmerückgewinnung

Der Abgaswärmestrom ist nach Durchgang durch den Erhitzerkopf (160 kW bei 700°C) für Heizzwecke oder als Prozesswärme nutzbar. Im Sinne einer möglichst hohen Stromproduktion sind hier allerdings weitere Modifikationen an der Anlage erforderlich.

Modifikation Verbrennung 1

Um die Größe des durchgesetzten Abgasmassenstromes messen zu können wurde ein Abgaswärmetauscher (Rohrbündelwärmetauscher) entwickelt, und zwischen Abgasgebläse und Stirlingmotor in den Rauchgasstrom eingebracht. Der Abgasmassenstrom kann so über die Energiebilanz am Wärmetauscher bestimmt werden. Als Nebeneffekt verringerte sich die Gefahr einer Überhitzung des Abgasgebläses bei einer Notabschaltung des Stirlingmotors, wie sie im Betrieb durch die sehr sensibel reagierende Steuerung mehrfach vorkam. Hierbei wird das Rauchgas direkt über den Bypass der Feuerung, unter Umgehung des Stirlingerhitzerkopfes, dem Abgasgebläse zugeführt.

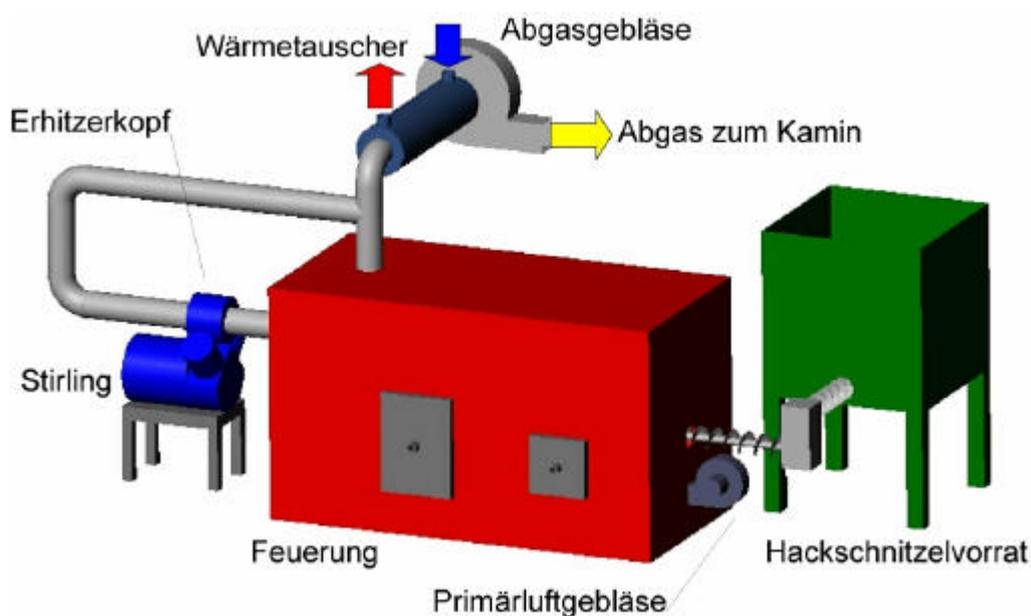


Abbildung 9 BHKW Modifikation 1

Modifikation Verbrennung 2

Ziel des nächsten Entwicklungsschrittes war eine Steigerung der Rauchgastemperatur durch Verbrennungsluftvorwärmung und Verringerung der Staubemissionen durch Änderung der Strömungsführung in der Feuerung. Die Verbrennungsluftvorwärmung wurde erreicht durch Ansaugung der Verbrennungsluft über den nun als Doppelrohrwärmetauscher ausgeführten Abgasweg (in folgenden Abbildung orange dargestellt).

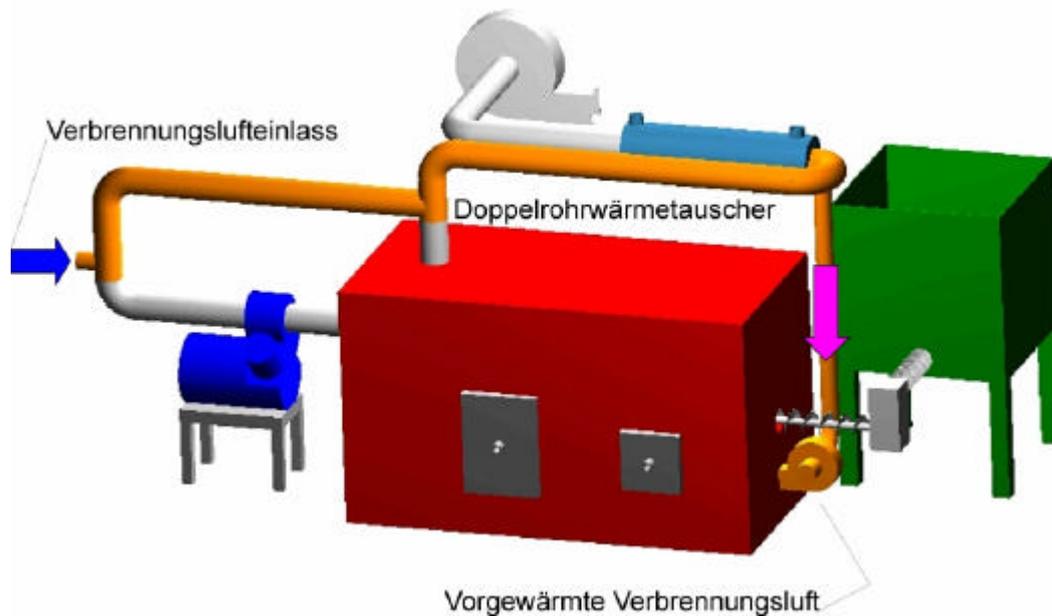


Abbildung 10 BHKW Modifikation 2

Die Primärverbrennungslufttemperatur erhöhte sich hierdurch bei einer Feuerungstemperatur von ca. 1000°C um ca. 250°K . Die maximal erreichbaren Feuerungstemperaturen lagen bei ca. 1100°C . Durch die Luftvorwärmung konnten Feuerungsleistungen bis 350kW (bei Hackschnitzeln mit 20% Feuchte) realisiert, sowie auch extrem feuchte Hackschnitzel verbrannt werden (Feuchte bis 100%). Durch die hohen Temperaturen, und die hierdurch verursachten Wärmespannungen begann sich die Feuerung zunehmend zu verformen. Aus diesem Grunde wurde die Feuerungstemperatur in folgenden Versuchen auf ca. 900°C begrenzt.



Abbildung 11 Anlagenfotos

Um die Staubemissionen der Feuerung zu verringern wurde die Rauchgasführung im Sekundärfeuerbereich verändert. In der serienmäßigen Feuerung sollte dieser Raum als Absetzzone für Staubpartikel dienen. Durch die ungünstigen Strömungsverhältnisse wurden hier allerdings kaum nennenswerte Staubanteile abgeschieden.

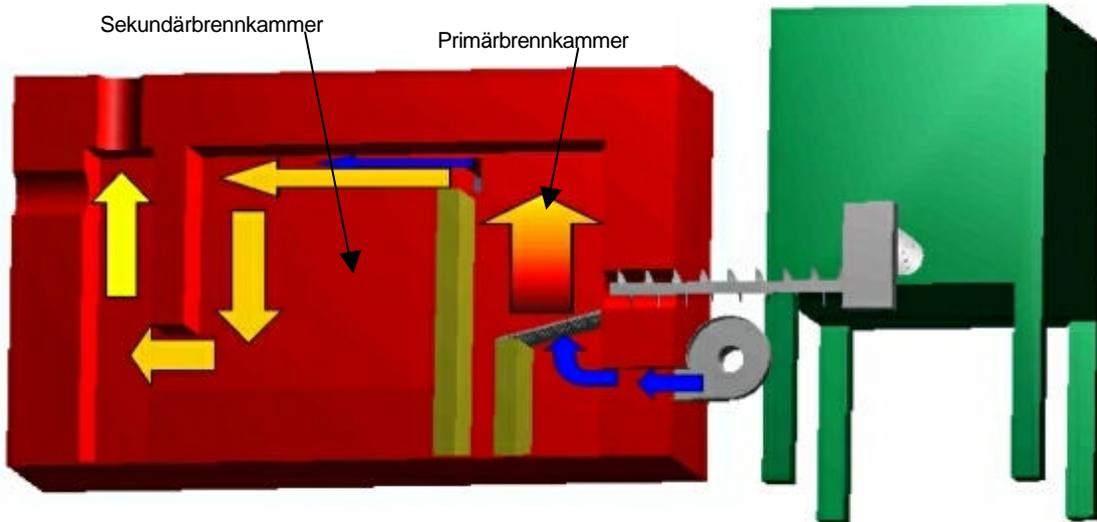


Abbildung 12 Strömungsführung der serienmäßigen Feuerung

In der modifizierten Sekundärbrennkammer werden die Rauchgase in eine wirbelförmige Bewegung gezwungen, und so definierte Staubabsetzonen geschaffen. Die staubbeladenen Rauchgase verlassen den Primärverbrennungsraum mit hoher Geschwindigkeit. Bei Eintritt in den Sekundärverbrennungsraum verringert sich die Strömungsgeschwindigkeit durch die hier zur Verfügung stehenden größeren Querschnitte stark. Dadurch können Staubpartikel auf den Boden der Brennkammer sinken, und durch die spezielle Form des eingebrachten Doppelbodens hier liegen bleiben. Zusätzlich wird die Verweilzeit der Rauchgase in dieser heißen Zone gesteigert, und so der Ausbrand weiter verbessert.

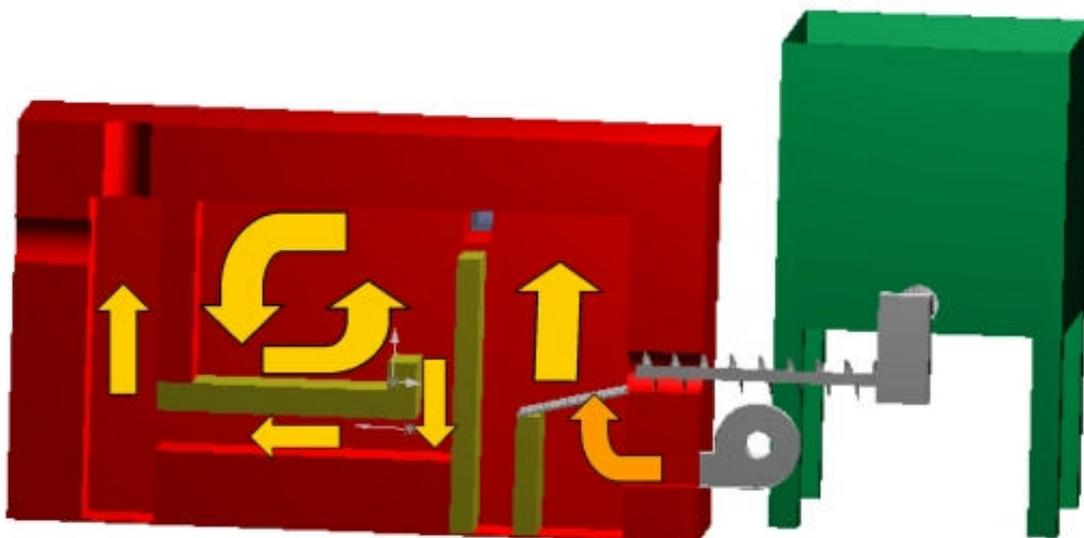


Abbildung 13 Strömungsführung in der modifizierten Feuerung

Die Staubemissionen blieben bei optimal eingeregelter Feuerung (reduzierter Luftüberschuss, hohe Verbrennungstemperaturen) dauerhaft unter 50 mg/m^3 .

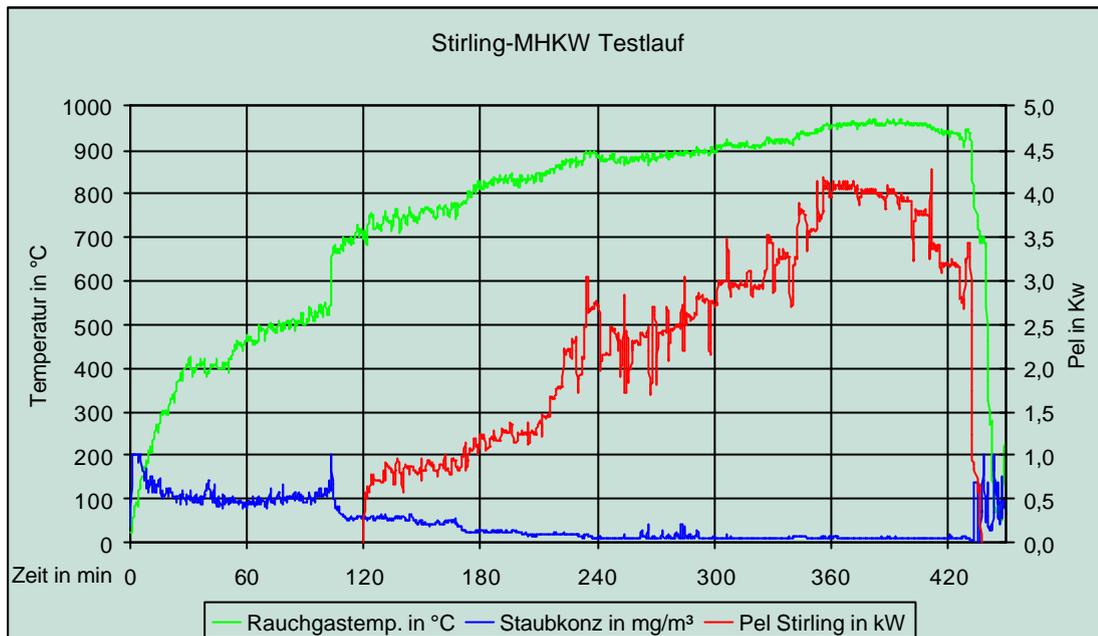


Abbildung 14 BHKW-Testlauf mit modifizierter Sekundärbrennkammer

Durch die Bauart der Feuerung (lange Flammwege) und die Betriebsweisen bei hohen Leistungen und Temperaturen erwies es sich als vorteilhaft ganz auf die Einspeisung von Sekundärluft zu verzichten, um einen möglichst hohen Luftmassenstrom durch den Schrägrost und das Brenngut in der Primärfeuerungszone zu ziehen. Dies war erforderlich, um bei der begrenzten Rostfläche der Feuerung die hohen Brennstoffmassenströme trocknen und pyrolyisieren zu können, bevor es zu einer Aufhäufung von Brennstoff auf dem Rost kam.



Abbildung 15 Aufhäufung von Brennstoff auf Schrägrost

Durch den gesteigerten Brennstoffdurchsatz ändern sich die Verbrennungsbedingungen in der Primärkammer der Feuerung. Durch punktuell hohe Verbrennungstemperaturen in der stärkeren Brennstoffschüttung kann man, abhängig von Holzfeuchte und Holzqualität, eine verstärkte Schlackebildung im Primärbereich der Feuerung beobachten. Die Schlackebildung wird verstärkt durch Verunreinigungen im Brennstoff (Steine), die je nach Qualität des Brennstoffes in veränderlichen Anteilen vorhanden sind.



Abbildung 16 Schmelze aus der Primärfeuerungskammer

Bei der installierten Schrägrostfeuerung sind diese harten Schmelzen problematisch, da sie manuell abgereinigt werden müssen, und so kein kontinuierlicher Dauerbetrieb möglich ist.

Modifikation Verbrennung 3

Zur Erzielung eines möglichst hohen elektrischen Wirkungsgrades der Anlage ist es notwendig möglichst große Energiemengen wieder dem Prozess zuzuführen. Idealerweise muss nur die vom Stirlingmotor abgenommene Energiemenge von der Feuerung ersetzt werden (wie im SOLO Erdgas-BHKW annähernd realisiert).

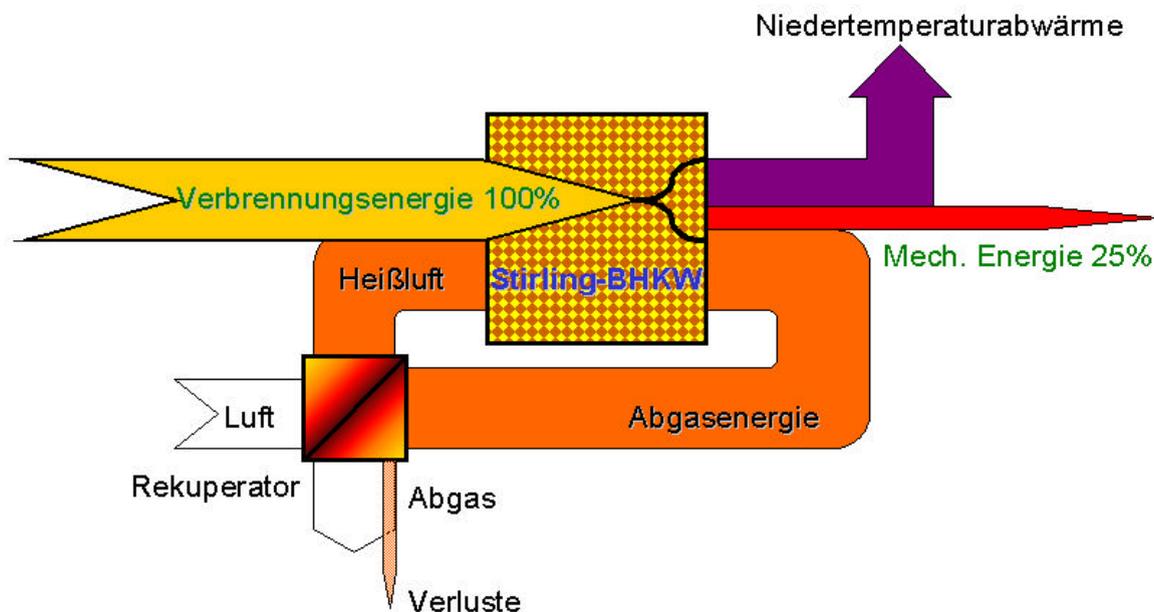


Abbildung 17 Energiefluss bei vollem Wärmerückgewinn

Um sich diesem Ziel zu nähern wurde der Wärmetausch an die Verbrennungsluft optimiert, indem der vorhandene Doppelrohrwärmetauscher nun im Gegenstrom betrieben wurde. Zusätzlich wurde ein Abgaswärmetauscher (Rohrbündelwärmetauscher) entwickelt und eingebaut, der die Verbrennungslufttemperatur weiter erhöht. Eine weitere Absicht war es die Anlage im

Primärverbrennungsraum understöchiometrisch zu betreiben, und so das Brenngut in diesem Bereich nur auszugasen. Das Brenngas wurde dann mit der stark vorgewärmten Sekundärverbrennungsluft direkt vor dem Wärmetauscher gemischt, um eine Sekundärverbrennung in unmittelbarer Nähe des Stirling-Erhitzerkopfes zu erzielen. Vorteile dieser Betriebsweise sollten neben reduzierten Gastemperaturen in der Feuerung auch geringere Strömungsgeschwindigkeiten auf dem Schrägrost, und somit geringere Staubkonzentrationen im Abgas (verringertes Mitreißen von Ascheteilchen) sein. Hierbei erwiesen sich die zahlreichen Undichtigkeiten der Anlage (Türen, Entaschungsschnecken, Reaktorschnecke, Klappen, Flansche,..) als äußerst störend, da eine stabile Reaktion mit $\lambda < 1$ und ausreichender Leistung im Primärfeuerungsraum nicht stabil erreicht werden konnte.

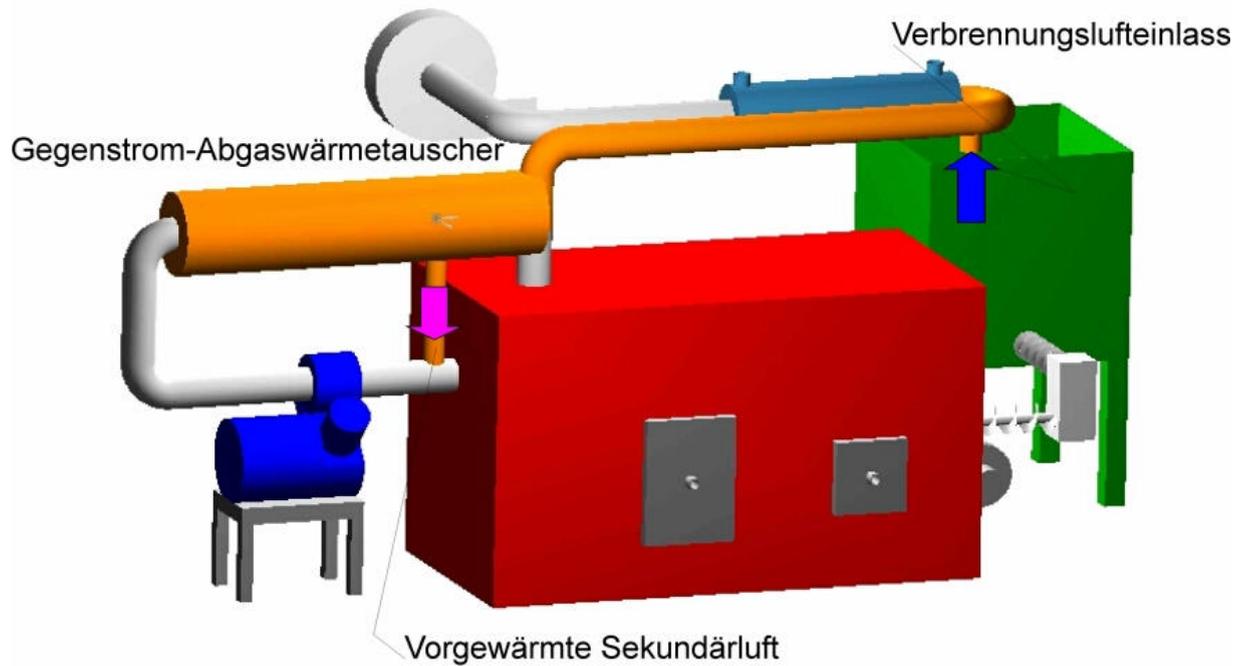


Abbildung 18 BHKW Modifikation 3

Schadstoffemissionen

Zur Bewertung der Feuerung wurden die Schadstoffemissionen abhängig vom Luftverhältnis λ ermittelt. Deutlich erkennbar ist ein sprunghafter Anstieg der CO-Emissionen bei $\lambda < 1,5$, bzw. der Emissionen unverbrannter Kohlenwasserstoffe (HC) bei $\lambda < 1,25$, sowie der zu erwartende Abfall der Stickoxidemissionen bei kleinem Lambda (Reduktionswirkung). Die Anlage hält bei richtiger Prozesssteuerung alle derzeit für diese Leistungsklasse gültigen Grenzwerte ein.

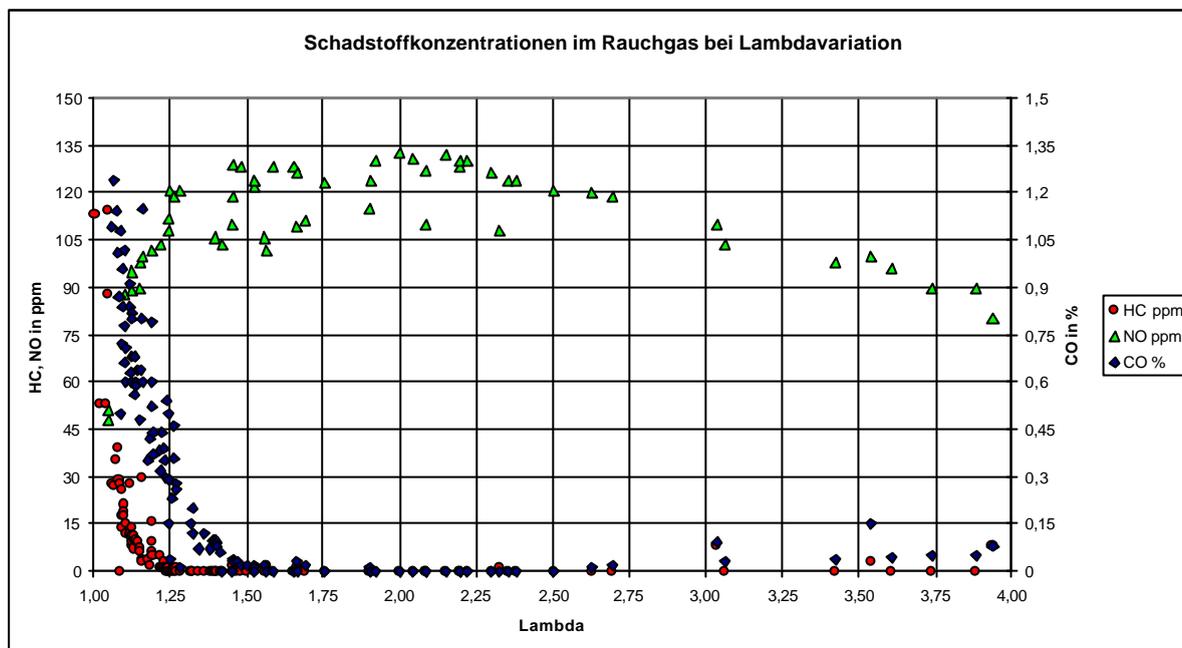


Abbildung 19 Schadstoffemissionen

Filterversuche

Um die Anzahl der aufschmelzenden Partikel im Erhitzerkopf zu reduzieren und den Mechanismus der Ablagerung zu untersuchen wurde eine Gittermatrix in den Rauchgasstrom eingebracht, um die Partikel noch vor dem Erhitzerkopf abzuscheiden. Die einzelnen Gitterelemente wurden so hintereinander angeordnet, dass die Staubpartikel keine Möglichkeit hatten in gerader Linie zum Wärmetauscher zu gelangen.



Abbildung 20 Mit Staub belegte Gittermatrix

Nach einem 6-stündigen Betrieb der Anlage bei ca. 800°C konnte eine ca. 2 mm starke Belegung der Gitterstege mit festhaftendem Staub festgestellt werden. Die Verschmutzungen konnten nur mechanisch entfernt werden, ein Abreinjigen mit Pressluft war nicht möglich.

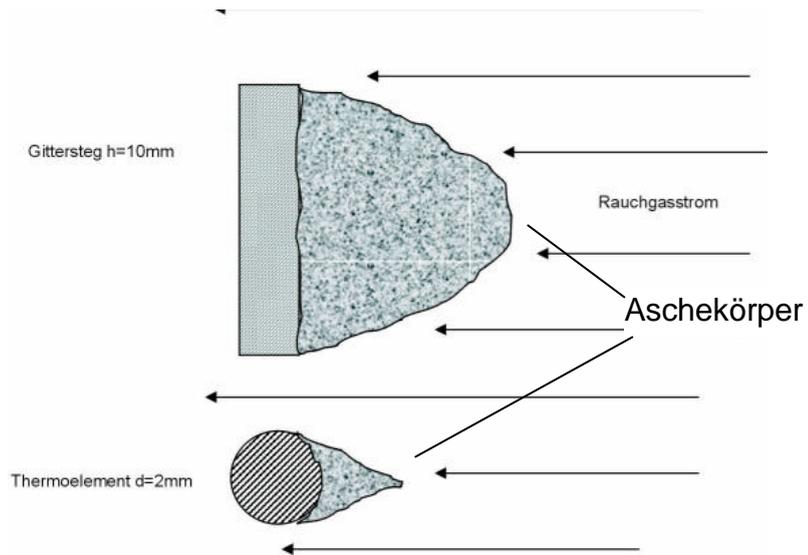


Abbildung 21 Ablagerungsschema

Hierauf aufbauend wurden verschiedene keramische Filterelemente in den Rauchgasweg eingebracht. Die Keramikfilter wurde jeweils ca. 6 Stunden mit Rauchgas beaufschlagt. Zum Einsatz kamen keramische Porenfilter aus Siliziumcarbid und Aluminiumoxid, sowie keramische Gewebefilter aus Aluminiumoxid.



Abbildung 22 Belegter Porenfilter Filter aus Aluminiumoxid

Um ein vorschnelles Verschmutzen der Filter zu verhindern wurde eine sehr grobe Poren- bzw. Maschenstruktur gewählt (ca. 2-5 mm lichte Weite). Hierbei konnte keine nennenswerte Verringerung der Staubemissionen beobachtet werden.



Abbildung 23 Keramische Filtermatte aus Aluminiumoxid

Auf den Filtern bildete sich ein glasartiger Überzug aus geschmolzener Asche, die die Filter schon nach der relativ kurzen Einsatzzeit so zusetzten, dass durch den erhöhten Durchströmungswiderstand ein Betrieb der Feuerung nicht mehr möglich war. Zusätzlich waren an den SiC-Bauteilen deutliche Oxidationserscheinungen erkennbar. Alle Filter waren nach den Versuchen nicht weiterverwendbar und mussten ausgetauscht werden.



Abbildung 24 Keramikfilter (SiC-Keramik) vor und nach Beanspruchung

Beurteilung der Erkenntnisse aus den Untersuchungen

Die einleitenden Untersuchungen haben folgende Erkenntnisse geliefert.

- Die Rauchgastemperaturen, die für einen effektiven Betrieb des Stirlingmotors notwendig sind, liegen auf einem Temperaturniveau bei dem mit bleibenden Ascheaufschmelzungen am Stirling-Erhitzerkopf zu rechnen ist.
- Bei Nutzung des vorhandenen Erhitzerkopfes sollte ein Wärmetausch vom Rauchgas auf Reinfluft stattfinden um eine Verschmutzung im Dauerbetrieb zu verhindern.
- Es ist nicht möglich das heiße Rauchgas für den Stirlingbetrieb ausreichend zu reinigen. Die für den geforderten Temperaturbereich in Frage kommenden Abscheidemethoden werden nachfolgend bewertet:

1. **Massenkraftabscheider**

Die von einer Holzfeuerung emittierten Staubpartikel haben bis zu 70% einen aerodynamischen Durchmesser $<1\mu\text{m}$ [ZB00]. Partikel dieser Größe lassen sich nicht durch Massenkraftabscheider entfernen. [Mar00].

2. **Elektrofiltration**

Wegen der im Verhältnis zur Gesamtanlage zu hohen Kosten scheidet diese Reinigungsmethode aus. Elektrofiltration ist erst ab einer Feuerungsleistung $>1\text{MW}$ rentabel.

3. **Filternde Abscheider**

Die Versuche haben gezeigt, dass die eingesetzten Filter unabhängig von Bauart und Filtermaterial schon nach wenigen Stunden Betrieb unbrauchbar waren, und ausgetauscht werden mussten. Eine Reinigung der kontaminierten Rauchgase mittels Filtration erscheint somit nicht sinnvoll.

Basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen wurden folgende Lösungsansätze erarbeitet, die einen Dauerbetrieb des Stirling-BHKW ermöglichen können.

1. Rauchgas-Reingas Wärmetauscher. Ein keramischer Hochtemperatur-Wärmetauscher gibt die im Rauchgas enthaltene Energie an vorgewärmte Reinfluft ab. Die Luft wird durch Ausnutzung der Abhitze des Kamins und der Rauchgasführungen vorgewärmt. Die heiße Reinfluft wird dem Stirlingmotor zugeführt, ein Teil der Wärme an den Erhitzerkopf abgegeben, und dann als Primärluft wieder dem System zugeführt. Wegen der hohen Temperaturen ($>1000^\circ\text{C}$) ist hier die Verwendung von Hochtemperaturkeramik notwendig. Problematisch hierbei sind allerdings die großen erforderlichen Flächen zur Wärmeübertragung, sowie die durch die hohen Temperaturen eingeschränkte Materialauswahl.
2. Neukonstruktion des Stirling-Erhitzerkopfes. Der Erhitzerkopf wird so angepasst, dass staubbeladene Rauchgase keine Funktionsbeeinträchtigungen auslösen. Dies kann durch eine geeignete Veränderung der Anzahl, Größe und Geometrie der Lamellen im Wärmetauscher erreicht werden.

Pelletfeuerung

Um die Versuchsabläufe zu erleichtern wurde der weitere Versuchsbetrieb an einer vorhandenen Pelletfeuerung des Typs Guntamatic „Biostar“ durchgeführt, die auf einem Motorenprüfstand der Fachhochschule aufgebaut, und mit der erforderlichen Messtechnik versehen wurde. Wesentlicher Vorteil ist die bessere Regelbarkeit und Kompaktheit der Anlage sowie die stark verkürzten Aufheizzeiten. Die für einen Betrieb der Feuerung als Brenner für ein Stirling-BHKW erforderlichen Rauchgastemperaturen sind wesentlich schneller verfügbar, als bei der bisher eingesetzten Holzhackschnitzelfeuerung.

Dies ist zu erklären durch die wesentlich geringere Masse der aufzuheizenden Feuerfestmaterialien. Staub- und Schadstoffemissionen bewegen sich wie erwartet auf einem sehr niedrigen Niveau deutlich unterhalb der gesetzlichen Grenzwerte.

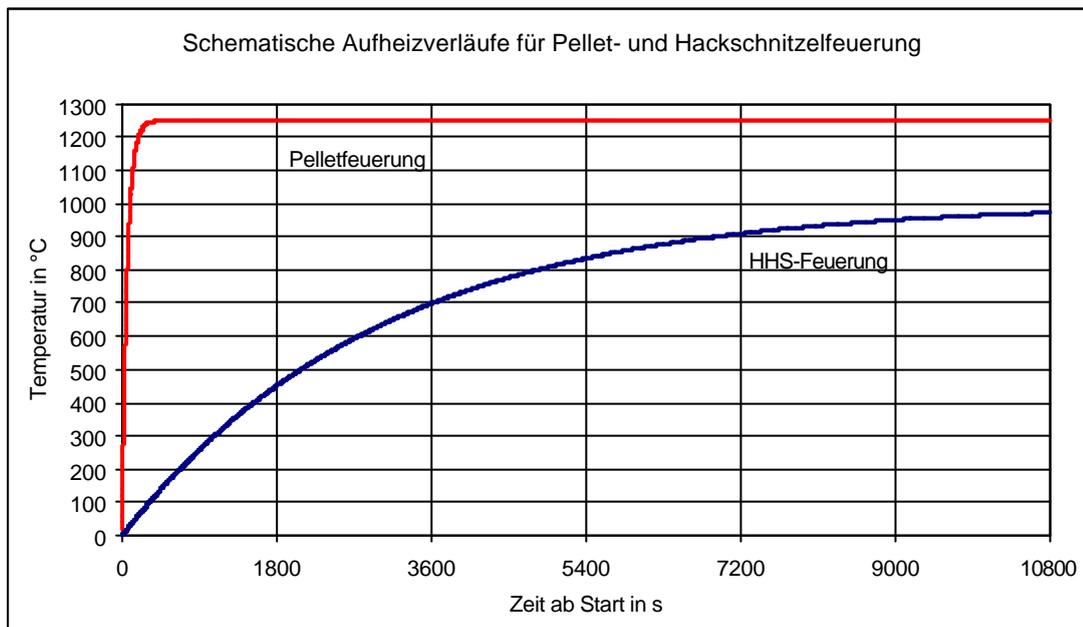


Abbildung 25 Schematische Aufheizverläufe

Pellets versprechen durch die gleichbleibende Brennstoffqualität und die geringeren Staubemissionen Vorteile gegenüber Hackschnitzeln beim Einsatz in einem Stirling-BHKW. Die Guntamatic Feuerung zeichnet sich durch eine sehr fortschrittliche Verbrennungstechnik mit einer primären Ausgasungszone und sekundärem Keramik Drallbrenner aus. Sie verfügt über eine Lambdaregelung und ist modular aufgebaut, d.h. der Feuerungsteil kann ohne großen Aufwand vom Warmwassererzeuger getrennt werden, und ist so für die Einbringung eines Stirling-Erhitzerkopfes gut geeignet. Außerdem ist die Feuerung zur besseren Abdichtung gegen Falschluf mit einer Zellradschleuse ausgestattet, was eine Variation des Luftverhältnisses (λ) erleichtert.



Abbildung 26 Prüfstand Pelletfeuerung

Anlagenkonzept mit Keramikwärmetauscher

In Zusammenarbeit mit dem Forschungsinstitut für anorganische Werkstoffe Glas/Keramik (FGK) wurden Lösungsansätze ausgearbeitet, die auf der Integration von hochtemperaturbeständigen Keramikbauteilen basieren. Hierzu wurden die verschiedenen Möglichkeiten zur Wärmerückgewinnung gegenübergestellt und bewertet [Wei02]:

- *Regeneratoren* – Regenerativ arbeitende Wärmetauscher nutzen zur Energieübertragung zwischen den Fluiden eine Speichermasse. Diese wird im wärmeren Fluid erhitzt, dann in das kältere Fluid transportiert, um dort die Energie wieder abzugeben. Hier ist insbesondere ein Wärmerad von besonderem Interesse. Zur Abschätzung der Wirtschaftlichkeit eines solchen Bauteiles in Bezug auf die Gesamtanlage, wurde dieses unter Zuhilfenahme einer computergestützten thermodynamischen Simulation ausgelegt, und von einem Wärmeradhersteller (Rototherm) in Bezug auf die Herstellungskosten bewertet. Da der Preis dieses Bauteiles 30% der Kosten der Gesamtanlage übersteigt, wurde diese Variante als nicht praktikabel eingestuft.
- *Rekuperatoren* – Ein Rekuperator überträgt die Wärme zwischen den Fluiden durch eine trennende Wand. Es gibt keine beweglichen Teile wie beim Regenerator. Zwei Bauarten sind üblich: Rohrbündel- und Plattenwärmetauscher. Der Rohrbündelwärmetauscher hat den Vorteil, dass er gut zu reinigen ist. Nachteil gegenüber dem Plattenwärmetauscher ist der relativ höhere Materialaufwand, und das bei gleicher Leistung größere Bauvolumen.

Da keramische Hochtemperaturwärmetauscher am Markt nicht erhältlich sind wurden verschiedene Konzepte erarbeitet, um durch Kombination von marktüblichen Halbzeugen einen Wärmetauscher darzustellen.

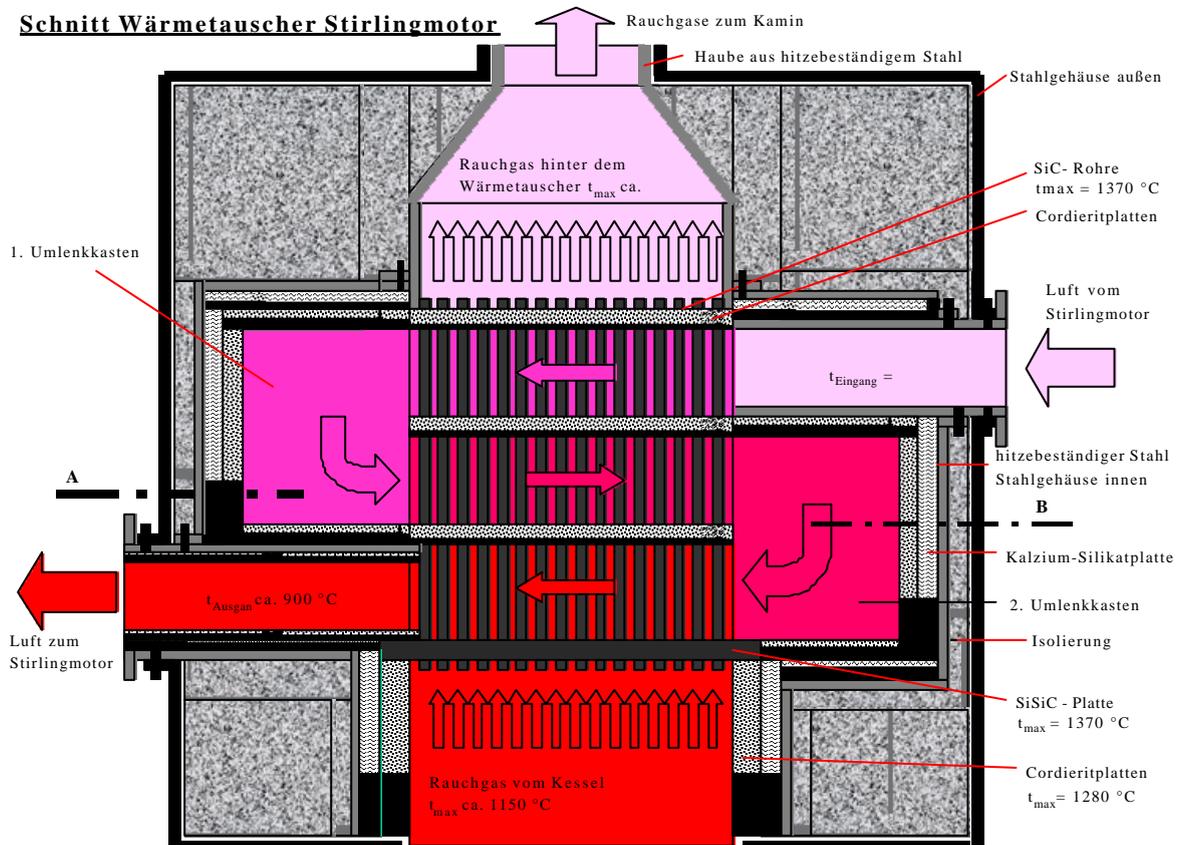


Abbildung 27 Keramischer Rohrbündelwärmetauscher (FGK)

Gegenüber Rohrbündelwärmetauschern haben Plattenwärmetauscher den Vorteil der höheren Energiedichte (ca. 2:1). Problematisch ist jedoch die Beschaffung der notwendigen Keramikplatten. Die Platten waren in der benötigten Dimension nicht am Markt erhältlich, und eine spezielle Anfertigung entsprechend den gegebenen Anforderungen hätte den finanziellen Rahmen des Projektes gesprengt.

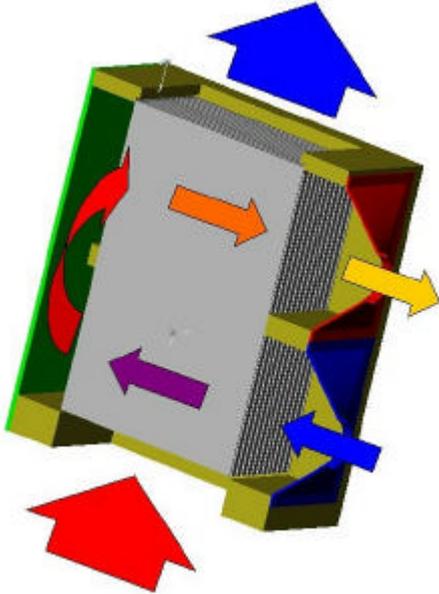


Abbildung 28 Keramischer Plattenwärmetauscher (FGK)

Aus der Wärmetauscherberechnung für ein markterhältliches Keramikrohr aus SiC-Keramik (d_i :10mm, D_a :15mm) ergibt sich bei konservativer Auslegung eine für die Wärmeübertragung notwendige Gesamtrohrlänge von ca. 200m. Um die prinzipielle Eignung des Wärmetausch-Verfahrens zu überprüfen wurde eine Rohrbündelwärmetauscher im Labormaßstab angefertigt. Hierzu wurden 7 Keramikrohre (d_i : 10mm, D_a : 15mm, l: 1000mm, SiC) zusammengefasst. Das Rauchgas durchströmt die Innenseite der Rohre, während die zu erwärmende Luft außen an den Rohren entlangstreicht.

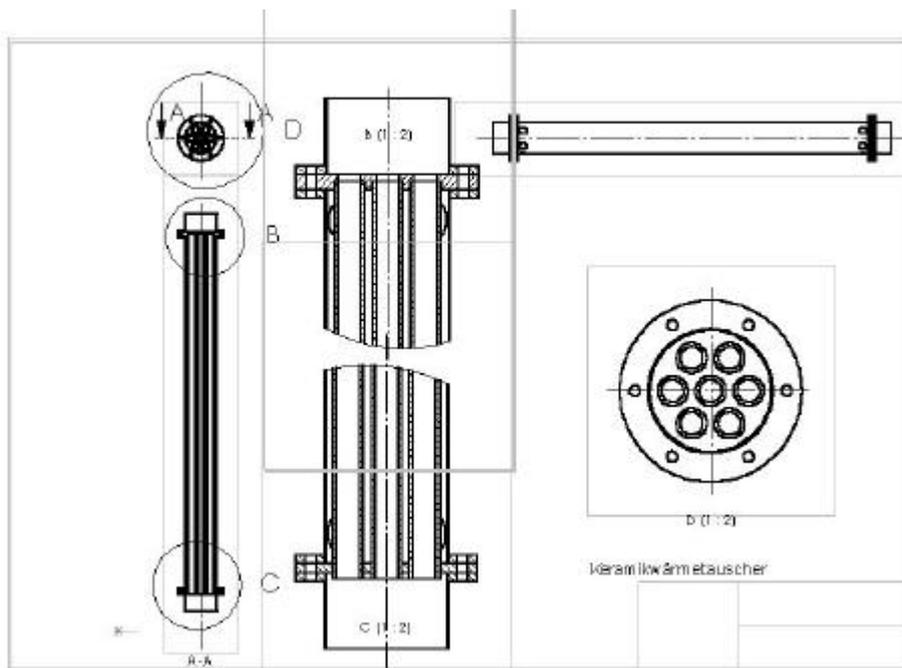


Abbildung 29 Keramik Hochtemperatur Abgaswärmetauscher

Alle eingesetzten wärmebelasteten Metallteile bestehen aus Nicrofer 6023H. Bei einer Feuerungstemperatur von 1150°C konnte eine Lufttemperatur von 1040°C bei ca. 7kW Wärmetauscherleistung erreicht werden. Nach einer Beaufschlagung des Wärmetauscher von ca. 10 Stunden zeigten sich erste bleibende glasartige Anhaftungen geschmolzener Aschepartikel. Es ist zu erwarten, dass sich die Keramikrohre im Dauerbetrieb weiter zusetzen und sich der Wärmetauscherwirkungsgrad in kurzer Zeit reduziert.



Abbildung 30 Keramikrohr mit glasiertem Staubüberzug (innen)

Stirling Erhitzerkopf zum Einsatz bei kontaminierten Abgasen

Um bei den vorliegenden kontaminierten Abgasen der Holzfeuerung einen Dauerbetrieb einer Stirling-BHKW Anlage gewährleisten zu können, wurde ein neuer Erhitzerkopf entwickelt. Der Erhitzerkopf besteht aus einem in axialer Richtung außen und innen verrippten Körper aus Kupfer, welches sich durch seine hervorragende Wärmeleitfähigkeit auszeichnet. In den Kupferkörper eingegossen befinden sich Rohrschlangen aus hitzebeständigen Nickelbasiswerkstoffen (NICroFer), die das unter hohem Druck (bis 150bar) befindliche Arbeitsgas des Stirlingmotors transportieren, und auch bei den hohen Temperaturen des Bauteils im Betrieb eine ausreichende Festigkeit gewährleisten. Der Kupferkörper allein wäre hierzu nicht in der Lage. Durch die grobe axiale Verrippung ist gewährleistet, dass sich partikelbelastete Abgase nicht ablagern können, oder durch einfache mechanische Maßnahmen abzureinigen sind. Die hohe Wärmeleitfähigkeit des Kupfers sorgt dafür, dass die Oberflächentemperatur (entspricht ungefähr der Arbeitsgastemperatur) des Wärmetauschers unterhalb des Bereiches bleibt, in dem sich Ascheanteile aus dem Abgas dauerhaft aufschmelzen.

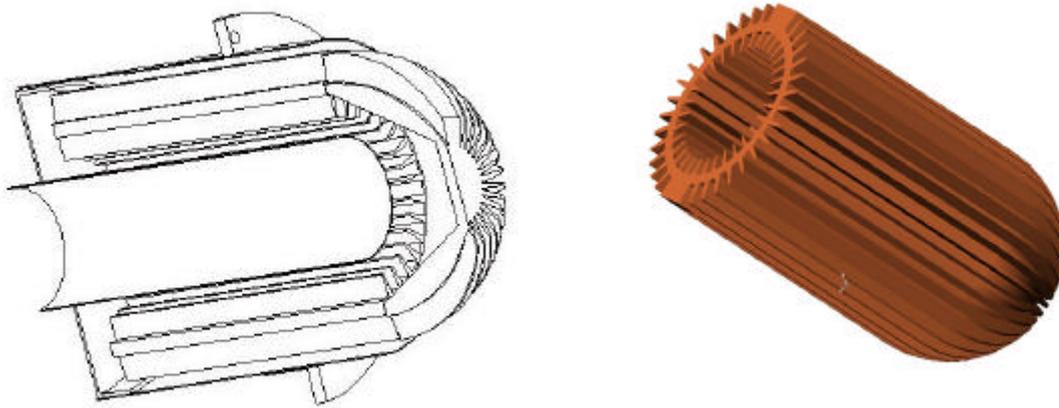


Abbildung 31 Verschmutzungsresistenter Erhitzerkopf

Die Strömungsführung des Rauchgases um den Wärmetauschers ist so gewählt, dass erst der Außen-, dann der Innenmantel umströmt wird. Die Abnahme des für die Gasströmung zur Verfügung stehenden Strömungsquerschnittes im Strömungsverlauf steht somit im Verhältnis zur Volumenstromabnahme durch die Abkühlung des Rauchgases ($dV/dT=const.$). Zusätzlich zur Oberflächenvergrößerung werden durch die doppelte Umspülung des Wärmetauschers auch Temperaturspitzen z.B. an der Eintrittskuppel verhindert.

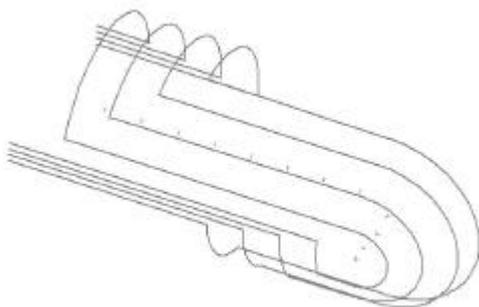


Abbildung 32 Röhrenbündel (rechte Seite)

Die eingegossenen Röhren, die das unter Druck stehende Arbeitsgas (z.B. Helium) des Stirlingmotors führen, haben alle den gleichen Strömungswiderstand, was durch eine gleiche Anzahl von Biegungen und gleiche Längen erreicht wird. Außerdem wird jedes Röhren über Oberseite, Unterseite und Kuppel des Wärmetauschers geführt, um eine gleichmäßige Wärmeabfuhr zu erreichen und Temperaturspitzen zu vermeiden.

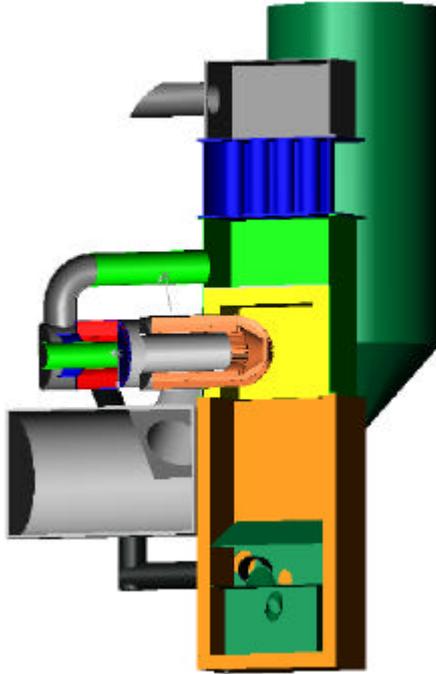


Abbildung 33 Einbausituation des neuem Erhitzerkopfes

Der Erhitzerkopf wurde in die Anlage integriert und mit Rauchgas beaufschlagt. Um die Messungen zu vereinfachen wurde die Wärmeabfuhr nicht über den Stirlingmotor, sondern über ein Pressluftkühlsystem vorgenommen. Nach der ca. 10-stündigen Beaufschlagung des Erhitzerkopfes mit Rauchgas waren die Oberflächen frei von Ablagerungen und nach wie vor metallisch blank.



Abbildung 34 Erhitzerkopf (neu) nach Beaufschlagung mit Rauchgas

Der Wärmetauscher eignet sich aufgrund seiner hervorragenden Wärmeabfuhr auch zum Einsatz in solaren Anwendungen. Durch eine entsprechende Anpassung der Bauform ist ein bivalenter Betrieb mit Holz und Sonne möglich. Hierdurch könnte eine optimale Kopplung regenerativer Energieträger erreicht werden, da so auch bei Wegfall der solaren Einstrahlung ein kontinuierlich regenerativer Betrieb eines auf diesem Wärmetauscher basierenden Stirling-BHKW möglich ist.

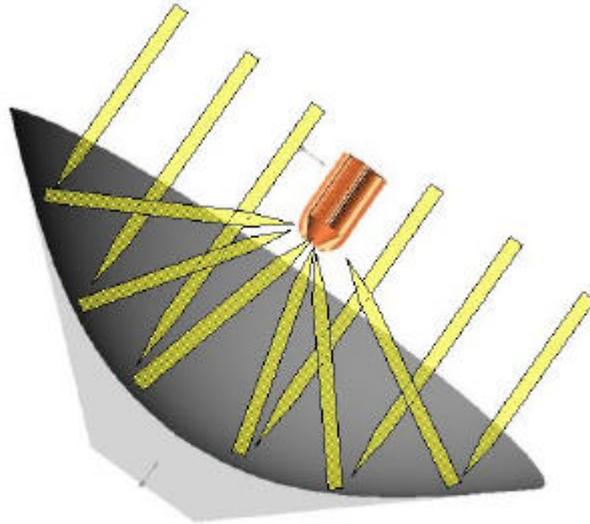


Abbildung 35 Wärmezufuhr durch solare Strahlung

Fazit

In dieser Entwicklungsarbeit konnte gezeigt werden, dass eine Reinigung der heißen Rauchgase zwischen Feuerung und Stirling-Erhitzerkopf auch unter Verwendung von Keramikbauteilen nicht möglich ist. Desweiteren hat sich herausgestellt, dass die Verschmutzungsproblematik besser kontrollierbar ist bei der Verwendung von Holzpellets, die aufgrund des geringen Staub-, Asche- und Wasseranteils und des enger spezifizierten Heizwertes deutliche Vorteile bei der Erzeugung und der Einhaltung der gewünschten Verbrennungsbedingungen aufweisen. Für diesen spezifizierten Brennstoff kann auch auf eine fortschrittlichere Brennertechnologie zurückgegriffen werden. Dadurch vereinfacht sich die Versuchsdurchführung, sodass die mit der Holzverbrennung verbundenen Auswirkungen der Aschepartikel besser untersucht werden können. Um das Ziel eines Dauerbetriebes eines holzbefeuerten Stirling-BHKW dennoch zu erreichen, war es notwendig, den Erhitzerkopf so zu modifizieren, dass keine anhaftenden Verschmutzungen mehr auftreten können. Der neuentwickelte Erhitzerkopf eignet sich aufgrund seiner hervorragenden Wärmeabfuhr auch zum Einsatz in solaren Anwendungen. Durch eine entsprechende Anpassung der Bauform ist ein bivalenter Betrieb mit Holz und Sonne möglich. Hierdurch könnte eine optimale Kopplung regenerativer Energieträger erreicht werden, da so auch bei Wegfall der solaren Einstrahlung ein kontinuierlich regenerativer Betrieb eines auf diesem Wärmetauscher basierenden Stirling-BHKW möglich ist. In einem weiteren Entwicklungsschritt könnte nun eine entsprechende Anlage zur energetischen Kopplung von Holz und Sonne unter Verwendung des neuentwickelten und zum Patent angemeldeten Erhitzerkopfes aufgebaut und untersucht werden. Ziel eines zukünftigen FuE-Vorhabens ist die Übertragung der, vom erdgasbetriebenen Stirling-BHKW bekannten, Flox-Brennertechnik auf Biomassefeuerungen, bei der die für den Stirlingmotor wichtige Verbrennungsluftvorwärmung integraler Bestandteil ist.

Literaturverzeichnis

- [ZB00] ZUBERBÜHLER, U. und BAUMBACH, G. (2000): *Entwicklung eines Feuerungskonzeptes zur Verbesserung des Ausbrandes bei gleichzeitiger NO_x Minderung bei der Holzverbrennung im gewerblichen Bereich*. Forschungsprojekt am Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen (IVD) der Universität Stuttgart.
- [HN97] HASLER, P. und NUSSBAUMER, T. (1997): *Partikelgrößenverteilung bei der Verbrennung und Vergasung von Biomasse*. Bundesamt für Energiewirtschaft.
- [SM94] STRECKER, M. und MARUTZKY, R. (1994): *Untersuchungen von Holz und Holzwerkstoffen auf Holzschutzmittel und deren Emissionen bei der Verbrennung*. Forschungsbericht 76-104 03518, Umweltbundesamt, Berlin.
- [Obe97] OBERNBERGER, I. (1997): *Nutzung fester Biomasse in Verbrennungsanlagen unter besonderer Berücksichtigung des Verhaltens aschebildender Elemente*. Habilitation am Institut für Verfahrenstechnik der TU-Graz.
- [Mar00] MARUTZKY, R. (2000): *Emissionsminderungskonzepte bei der energetischen Nutzung von Gebrauchtholz*. Fraunhofer Institut für Holzforschung Braunschweig.
- [Wei02] WEIFFEN, M. (2002): *Auslegung eines rekuperativen und eines regenerativen Systems zur Verbrennungsluftvorwärmung für ein Holz-Stirling BHKW*. Diplomarbeit an der Fh-Bingen.
- [Bau96] BAUMÜLLER, A., (1996): *Anwendungen und Märkte für stationäre Stirlingmaschinen heute*. Vortrag Europäisches Stirling Forum 1996, Osnabrück.
- [Car98] CARLSEN, H. (1998): *Results from tests with wood chips as fuel in a large Stirling engine*. Vortrag Europäisches Stirling Forum 1998, Osnabrück.
- [LMZ00] LEIBOLD, H., MAI, R. und ZIMMERLIN, B. (2000): *Nachrichten Forschungszentrum Karlsruhe (ITC)*, Jahrgang 32 3/2000.

Veröffentlichungen und Vorträge

ENTWICKLUNGSSCHRITTE BEIM HOLZ-STIRLING BLOCKHEIZKRAFTWERK DER
FACHHOCHSCHULE BINGEN

European Stirling Forum, 18.und 19.September 2002, Osnabrück.

KRAFT-WÄRME-KOPPLUNG MIT HOLZPELLETS

Energietag Rheinland-Pfalz, 19 September 2002, Bingen.

KRAFT-WÄRME-KOPPLUNG MIT HOLZ

VWEW-Fachtagung: Regionale Anwendungen von effizienten Energieumwandlungstechniken, 29
Oktober 2002, Bingen.

DAS HOLZ-STIRLINGMOTOR BLOCKHEIZKRAFTWERK AN DER FACHHOCHSCHULE
BINGEN

Regenerative Energienutzung in Rheinland-Pfalz im Rahmen der Europäischen Biomassetage, 2.
Oktober 2002, Bingen.